



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

METODIKA MĚŘENÍ KVALITY OTISKŮ PRSTU

METHODOLOGY OF FINGERPRINT IMAGE QUALITY MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TOMÁŠ ORAVEC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ KANICH

BRNO 2018

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav inteligentních systémů

Akademický rok 2017/2018

Zadání diplomové práce

Řešitel: **Oravec Tomáš, Bc.**

Obor: Bezpečnost informačních technologií

Téma: **Metodika měření kvality otisků prstu**

Methodology of Fingerprint Image Quality Measurement

Kategorie: Zpracování obrazu

Pokyny:

1. Prostudujte literaturu týkající se biometrického rozpoznávání podle otisků prstů s důrazem na zjištění kvality otisku. Seznamte se s standardem pro kvalitu otisku NFIQ.
2. Analyzujte nedostatky v posuzování kvality otisku NFIQ s využitím dostupných databází.
3. Navrhněte metodiku hodnocení kvality otisku prstu. Při návrhu se zaměřte na nedostatky zjištěné v předchozím bodě.
4. Implementujte algoritmus pro navrženou metodiku.
5. Otestujte algoritmus z předchozího bodu s využitím dostupných databází otisků prstů.
6. Dosažené výsledky shrňte a diskutujte. Uveďte možná vylepšení a rozšíření Vašeho řešení.

Literatura:

- Maltoni, D., Maio, D., Jain, A.K. and Prabhakar, S.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer, 2009, pages 512. ISBN 978-1-8488-2254-2.
- Kanich, O.: *Fingerprint Damage Simulation - A Simulation of Fingerprint Distortion, Damaged Sensor, Pressure and Moisture*, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2014, p. 57. ISBN 978-3-659-63942-5.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Body 1 až 3.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování diplomové práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva diplomové práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap, které byly vyřešeny v rámci dřívějších projektů (30 až 40% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Kanich Ondřej, Ing., UITS FIT VUT**

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 23. května 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav inteligentních systémů
612 66 Brno, Božetěchova 2

doc. Dr. Ing. Petr Hanáček
vedoucí ústavu

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá metodikou hodnotenia kvality odtlačkov prstov. Prvou úlohou bola analýza už existujúceho softvéru na hodnotenie kvality, nazývaného NFIQ (*NIST Fingerprint Image Quality*), zhodnotenie jeho funkčnosti a identifikácia slabín. Za účelom odstránenia zistených nedostatkov NFIQ bola navrhnutá a implementovaná alternatívna metodika hodnotenia kvality odtlačkov, ktorej výsledky sú následne porovnávané s ostatnými metódami.

Abstract

This thesis deals with the problem of methodology of fingerprint image quality measurement. The first task was to analyze already existing software used for fingerprint quality measurement called NFIQ (*NIST Fingerprint Image Quality*), evaluate its performance and identify weaknesses. In order to eliminate discovered NFIQ weaknesses, different fingerprint quality estimation methodology was introduced, and its results were compared to other methodologies.

Klíčové slová

odtlačok prsta, hodnotenie kvality odtlačku prsta, NIST, NFIQ

Keywords

fingerprint, fingerprint quality estimation, NIST, NFIQ

Citácia

ORAVEC, Tomáš. *Metodika měření kvality otisků prstu*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Kanich

Metodika měření kvality otisků prstu

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne pod vedením Ing. Kanicha. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....

Tomáš Oravec

21. mája 2018

Podakovanie

Na tomto mieste by som rád poďakoval svojmu vedúcemu Ing. Kanichovi za odbornú pomoc, ústretový prístup a cenné rady pri písaní tejto práce.

Obsah

1	Úvod	3
2	Základy biometrie	4
3	Odtlačok prsta	6
3.1	Papilárne línie	6
3.2	Klasifikácia odtlačkov	7
3.3	Porovnávanie odtlačkov	7
3.4	Získavanie odtlačkov	8
3.5	Faktory ovplyvňujúce kvalitu odtlačku	11
4	NIST Fingerprint Image Quality	15
4.1	Definícia kvality	15
4.2	Meranie kvality	17
4.3	Analýza funkčnosti	20
5	Návrh novej metodiky hodnotenia kvality odtlačku	26
5.1	Vstupný obrázok	28
5.2	Odlíšenie odtlačku od pozadia	29
5.3	Vypočítanie orientácií	29
5.4	Rozdelenie okna na časti	32
5.5	Kontinualita	32
5.6	Využitie lineárnej regresie	33
5.7	Kontrast	35
5.8	Výsledné zhodnotenie kvality	36
6	Implementácia	37
6.1	Možnosti aplikácie	37
7	Porovnanie výsledkov	39
8	Záver	43
	Literatúra	45
A	Príklady odtlačkov jednotlivých kvalít podľa NFIQ	47
B	Analýza NFIQ v súvislosti s jemne poškodenými odtlačkami	49

C	Analýza novej metodiky v súvislosti s jemne poškodenými odtlačkami	52
D	Príklady odtlačkov jednotlivých kvalít podľa novej metodiky	53
E	Obsah priloženého CD	55

Kapitola 1

Úvod

Žijeme v digitálnej dobe. Časom, kedy sme všetku prácu museli robiť ručne už dávno odzvonilo, a oblasti, ktoré ešte neboli pomocou technológií vylepšené, by sme hľadali už len ťažko. Počítače sú dnes už naozaj všade - či už ako súčasť telefónov, hodínok, alebo televízií. S ich stále sa zvyšujúcim výkonom prichádzajú aj nové možnosti ich využitia, a technológie, ktoré boli donedávna prístupné len malej časti ľudí, sa postupne začínajú dostávať medzi širokú verejnosť.

Typickým príkladom sú biometrické systémy. Každý z nás určite vlastní nejakú vec, voči ktorej je potrebné preukázať svoju totožnosť. Dokazovanie totožnosti heslom však môže byť v niektorých ohľadoch nepraktické (čo ak heslo zabudneme?), a v určitých oblastiach začína byť pomaly nahradzované inými technikami. Príkladom môžu byť mobilné telefóny, u ktorých je dnes už prihlasovanie pomocou odtlačku prsta široko využívaným štandardom. S pokrokom technológií sa však objavujú aj nové problémy, ktoré treba riešiť. Porovnávanie biometrických vzorov totiž nie je tak jednoduché, ako napríklad u hesiel. Samotné porovnávanie je zložitý proces, ktorý nemusí byť vždy neomylný, a ktorého rozlišovacia schopnosť je úzko spätá s kvalitou porovnávaných biometrických vzorov. A práve problémom kvality biometrických vzorov, konkrétne odtlačkov prsta, sa budeme v tejto práci zaoberať.

Druhá a tretia kapitola tejto práce sa zaoberajú vysvetlením základných pojmov potrebných pre pochopenie ďalších častí práce. Obsahujú stručný prehľad princípu fungovania biometrického systému, štruktúry odtlačkov, ich klasifikáciu, porovnávanie, získavanie a rozoberajú faktory vplývajúce na kvalitu.

Vo štvrtej kapitole je detailne opísaná už existujúca metóda hodnotenia kvality, nazývaná NFIQ (*NIST Fingerprint Image Quality*), ktorej funkcionality však môže byť aj napriek jej dlhému vývoju v niektorých prípadoch spochybniteľná. Tieto prípady sú následne ukázané a analyzované.

Piata kapitola sa zaoberá návrhom alternatívnej metodiky hodnotenia kvality, ktorej účelom je odstrániť nedostatky v posudzovaní kvality podľa NFIQ. Krok po kroku opisuje jednotlivé časti hodnotenia kvality tak, aby podľa nich bolo možné vytvoriť funkčné riešenie.

V šiestej kapitole je opísaná vytvorená aplikácia implementujúca algoritmy z predchádzajúcej kapitoly, a sú predstavené možnosti aplikácie spolu s vysvetlením jej výstupu.

Siedma kapitola sa venuje zhodnoteniu dosiahnutých výsledkov, a porovnáva ich voči výsledkom z už existujúcich programov NFIQ a VeriFinger, pričom kladie dôraz na tie odtlačky, u ktorých hodnotenie pomocou NFIQ zlyhalo.

Posledná, ôsma kapitola, obsahuje stručný súhrn dosiahnutých výsledkov spolu s návrhmi, ako by bolo možné navrhnuté riešenie v budúcnosti rozšíriť a vylepšiť.

Kapitola 2

Základy biometrie

Pojem biometria pochádza z gréčtiny a skladá sa zo slov *bios* a *metron*, ktoré sa dajú voľne preložiť ako “meranie života”. V kontexte informačných technológií biometria vyjadruje automatické rozpoznávanie ľudí na základe ich charakteristických anatomických črt (napr. odtlačok prsta, obraz dúhovky, sietnice) a ich charakteristického správania (napr. spôsob chôdze, podpis) [5]. Aby mohla byť určitá črta použitá ako kritérium biometrického systému, musí spĺňať nasledujúce vlastnosti [9]:

- univerzálnosť - každá osoba musí mať danú črtu
- unikátnosť - žiadne dve osoby nemôžu mať danú črtu rovnakú
- konštantnosť - črta by sa nemala meniť v čase
- získateľnosť - črta musí byť získateľná a kvantitatívne merateľná
- akceptácia - ľudia musia byť ochotní danú črtu poskytnúť
- bezpečnosť - vytvorenie falzifikátu danej črty nemôže byť jednoduché

V porovnaní s inými metódami overenia totožnosti (napríklad heslom), je hlavou výhodou biometrie fakt, že dané snímané črty nemôžu byť stratené alebo zabudnuté. Používanie biometrie má však aj svoje nevýhody. Hlavnou nevýhodou je, že ani rovnaké biometrické vzorky pochádzajúce od rovnakého človeka nie sú v dôsledku rozdielnych podmienok snímania 100% zhodné. V praxi to znamená, že výsledok porovnávania vzorov nie je binárny (áno/nie, ako napríklad u hesla), ale v podobe skóre, ktoré vyjadruje, ako veľmi sa dané vzorky zhodujú. Musí byť teda stanovená hodnota prahu T , ktorá bude udávať minimálnu potrebnú hodnotu skóre porovnania na to, aby boli dva vzory prehlásené za zhodné. S touto problematikou súvisí niekoľko pojmov [5], ktorých znalosť je pre pochopenie ďalších častí práce nevyhnutná.

Match score - skóre porovnania dvoch rovnakých biometrických vzorov pochádzajúcich od rovnakého človeka.

Non-match score - skóre porovnania dvoch rovnakých biometrických vzorov pochádzajúcich od dvoch rôznych ľudí.

FMR (False match rate) - je pravdepodobnosť, že biometrický systém klasifikuje dva rôzne biometrické vzory za zhodné.

FNMR (False non-match rate) - je pravdepodobnosť, že biometrický systém klasifikuje dva zhodné biometrické vzory za rôzne.

Kapitola 3

Odtlačok prsta

Odtlačky prstov sú najznámejšou a najširšie používanou biometrickou črtou s dlhou históriou [9]. Niekoľko tisíc rokov staré odtlačky boli objavené na rôznych archeologických artefaktoch po celom svete, čo dokazuje, že už vtedy si ľudia uvedomovali ich jedinečnosť. Prvé techniky vedeckého spracovania odtlačkov sa datujú do roku 1686, kedy Marcello Malpighi, profesor anatómie na univerzite v Bologne, napísal prvú prácu zaoberajúcu sa štruktúrou odtlačkov. Táto práca vzbudila veľký záujem, a do výskumu sa postupom času zapájalo viac a viac ľudí. V roku 1880 predstavil Henry Fauld vedeckú prácu ktorá tvrdila, že odtlačky sú jedinečné, a položila základy modernej daktyloskopie. V roku 1888 na jeho prácu nadviazal Sir Francis Galton, ktorý predstavil markanty v súvislosti s porovnávaním jednotlivých odtlačkov. Skúmanie odtlačkov vyvrcholilo začiatkom 20. storočia, kedy bola daktyloskopia oficiálne akceptovaná ako metóda identifikácie a začala sa používať vo forenzných oblastiach. Vo svete začali vznikať prvé databáze odtlačkov, v ktorých sa vyskytovali hlavne odtlačky rôznych kriminálnikov. V roku 1924 už disponovala FBI odtlačkami od 810 000 osôb. Spracovaním a porovnávaním odtlačkov boli poverené špeciálne tímy ľudí, ktoré však kvôli veľmi rýchlemu rastu databáze, ako aj žiadostí na porovnanie, neboli schopné poskytovať výsledky v rozumnom čase. V roku 1960 sa preto začali vyvíjať prvé automatizované systémy na rozoznávanie odtlačkov (AFIS), ktoré sa ukázali byť tak užitočné, že sa dnes používajú skoro v každom vládnom úrade [9][13].

3.1 Papilárne línie

Základnou stavebnou jednotkou odtlačkov prstov sú papilárne línie, ktoré predstavujú viditeľné súvislé vyvýšené reliéfy na bruškách prstov o výške 0,1 až 0,5 mm a šírke 0,2 až 0,7 mm. Výsledná štruktúra papiálnych línií je čiastočne určená DNA, ale ich presná štruktúra je ovplyvnená náhodnými javmi (napr. poloha plodu v maternici alebo presné zloženie a hustota plodovej vody), ktoré zabezpečujú, že aj jednovaječné dvojčatá budú mať odtlačky prstov rozdielne. Vývoj tvaru papilárných línií sa ustáli okolo siedmeho mesiaca vývoja plodu, a od toho momentu sú relatívne nemenné, a výborné pre identifikáciu [9][13].

Papilárne línie sú len ťažko odstrániteľné - nedajú sa odstrániť napr. odrezaním, spálením, alebo odrením pokožky. Ak sa o to pokúsime, papilárne línie sa časom zregenerujú do pôvodného tvaru. Ich štruktúra je totiž zakotvená v hlbšej vrstve kože, a viditeľné papilárne línie sú len obalom, ktorý kopíruje hlbšiu štruktúru. Jediným účinným spôsobom odstránenia papilárných línií je preto len priame poškodenie týchto hlbších vrstiev kože.

3.2 Klasifikácia odtlačkov

Papilárne línie vytvárajú na povrchu prsta rozličné vzory, ktoré sa líšia tvarmi, miestami s vysokou frekvenciou spájania alebo špecifickými zakriveniami. Tieto miesta nazývame singularity, a rozlišujeme dva základné druhy: delta a jadro [9][13]. Delta je miesto, kde sa stretávajú papilárne línie z troch rôznych smerov, a jadro predstavuje stred odtlačku prsta. Na základe vzájomných polôh jednotlivých singularít a ich počte môžeme odtlačky prstov rozdeliť do niekoľkých základných tried, zobrazených na obrázkoch 3.1:

- **Left/right loop** - najčastejšia trieda, vyskytuje sa približne u dvoch tretín všetkých odtlačkov (65%). Obsahuje jedno jadro a jednu deltu.
- **Whorl** - obsahuje dve delty a dve jadrá, vyskytuje sa približne u 27% odtlačkov.
- **Arch** - neobsahuje žiadne singularity, vyskytuje sa len zriedka.
- **Tended arch** - obsahuje jednu deltu, spravidla umiestnenú pod jadrom a spolu s odtlačkami typu *arch* sa vyskytuje u necelých 7% populácie.



(a) Arch



(b) Tended Arch



(c) Whorl



(d) Left Loop



(e) Right Loop

Obr. 3.1: Odtlačky rôznych tried, pochádzajúce z NIST Special Database 4 [15].

Klasifikácia odtlačkov do tried je dôležitým predkrokom pre samotné vyhľadávanie, pretože umožňuje rýchle zamietnutie odtlačkov patriacich do iných tried. To je požadované hlavne u veľkých databáz, ako napr. databáza používaná FBI, ktorá obsahuje viac ako 100 miliónov odtlačkov [11]. Doba vyhľadávania sa pomocou klasifikácie teda dokáže skrátiť od o 33% (u odtlačku typu loop) až do 93% (u odtlačku typu arch).

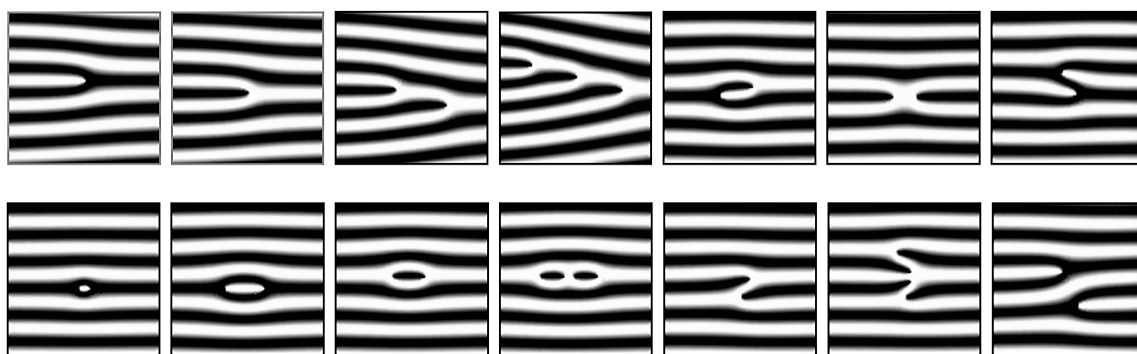
3.3 Porovnávanie odtlačkov

Keďže klasifikácia odtlačkov nie je na účely ich porovnávaní ani zďaleka dostatočná, popisujeme odtlačky ďalšími vlastnosťami, ktoré nazývame markanty. Markanty predstavujú

jenné abnormality na inak rovnobežných papilárnych líniách, a sú nemenné a zároveň unikátne. V tejto práci budeme rozlišovať nasledujúce dva typy markantov [13][5]:

- **Termination** - ukončenie papilárnej línie.
- **Bifurcation** - zlúčenie dvoch papilárnych línií do jednej.

Existujú aj ďalšie druhy markantov, ako napríklad bod, prípadne rôzne kombinácie typov predošlých (dvojité/trojité zlúčenie..., obrázok 3.2). Vzhľadom na zvýšenú zložitost ich porovnávaní, ako aj zvýšenie počtu možných chýb, sa však v počítačovom spracovaní nevyužívajú vôbec.



Obr. 3.2: Rôzne druhy markantov [5].

3.4 Získavanie odtlačkov

Keďže spôsob získania odtlačku určuje výslednú podobu odtlačku, ktorého kvalita má výrazný vplyv na porovnávanie, získavanie odtlačkov je jedným z najkritickejších krokov porovnávaní. Princíp je jednoduchý - potrebujeme získať obrázok, na ktorom bude možné čo najpresnejšie vidieť jednotlivé papilárne línie prsta.

Historicky prvé snímanie odtlačkov (využívané predovšetkým právnymi orgánmi) bolo realizované pomocou atramentu. Bruško prsta bolo namočené do nádoby s tmavým atramentom, a následne odtlačené na biely papier. Výsledná digitálna podoba sa získala buď jeho naskenovaním, alebo fotografiou. Tento proces sa nazýva *off-line fingerprint acquisition*, príp. *off-line sensing* a vzhľadom na jeho negatíva (proces je relatívne pomalý, vyžaduje zašpinenie prsta a nedáva žiadne záruky o výslednej kvalite) je už dnešnej dobe väčšinou nahradený sofistikovanejšími metódami [13].

Typická štruktúra dnešných skenerov odtlačkov pozostáva z dvoch častí. Prvou je senzor, ktorý číta vzory papilárnych línií priamo z povrchu prsta a následne ich prevádza pomocou A/D konvertoru (*Analog to digital*) do digitálnej podoby. Druhou časťou je komunikačný protokol, ktorý zasiela naskenované výsledky na ďalšie spracovanie.

Podľa spôsobu použitia môžeme dnešné skenery rozdeliť na dve hlavné skupiny: dotykové (*touch*) a prietahové (*sweep*). Hlavnou výhodou dotykových skenerov je ich veľmi jednoduché a intuitívne použitie. Užívateľ len priloží prst na danú plochu senzoru. Jednoduchosť výrazne prispela k masovému rozšíreniu tohto typu skeneru a ten sa dnes používa aj v bežných domácnostiach, napríklad ako súčasť zabezpečenia počítačov alebo smartfónov. Druhý typ skeneru, prietahový, funguje na princípe pretiahnutia prstu skrz senzor. Počas

posúvania prstu nad senzorom sa robia čiastočné snímky, ktoré spolu sformujú výsledný odtlačok. Hlavnou výhodou tohto typu skeneru je jeho menšia veľkosť, avšak za cenu vyššej zložitosti.

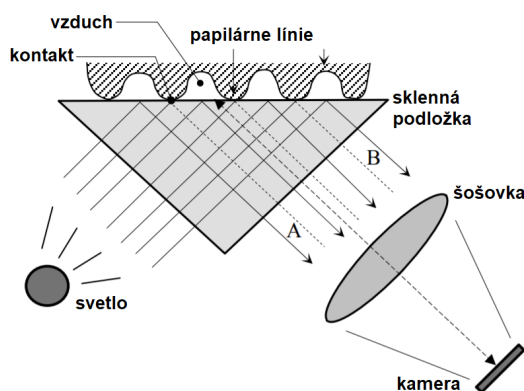
Podľa použitej snímačej technológie senzoru môžeme skenery rozdeliť do niekoľkých hlavných skupín.

3.4.1 Optické senzory

Za optické senzory môžeme vo všeobecnosti označiť tie, ktoré snímajú štruktúru prsta na základe jeho svetelných vlastností. Môžeme ich rozdeliť do niekoľkých nasledujúcich podskupín.

FTIR

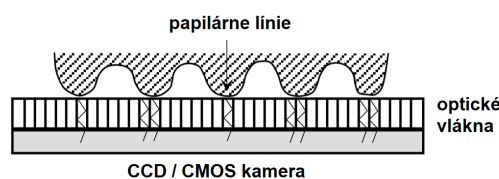
Frustrated Total Internal Reflection je najstaršia a najpoužívanější metóda skenovania odtlačkov, ktorej počiatky siahajú až do roku 1984. Princíp spočíva v priložení odtlačku na priesvitnú podložku (väčšinou sklenenú) a jeho osvetlením difúznym svetlom z jednej strany. To je následne odrazené z vrcholov papilárnych línií, a rozptýlené (absorbované) z ostatných častí odtlačku. Odrazené svetlo je na opačnej strane zaoštrované šošovkou do kamery (CCD, CMOS), ktorá na jeho základe zostaví obraz odtlačku. Hlavnou výhodou tohto typu senzoru je, že pracuje s trojdimenzionálnou štruktúrou povrchu prsta, a vďaka tomu nemôže byť oklamáný jednoduchým obrázkom odtlačku. Medzi nevýhody patria napríklad jeho väčšie rozmery v porovnaní s inými skenermi (vzdialenosť medzi priesvitnou plochou a kamerou nemôže byť veľmi znížená, pretože by to spôsobilo optické skreslenie výsledného odtlačku) [13][7].



Obr. 3.3: Princíp technológie FTIR [13].

Optické vlákna

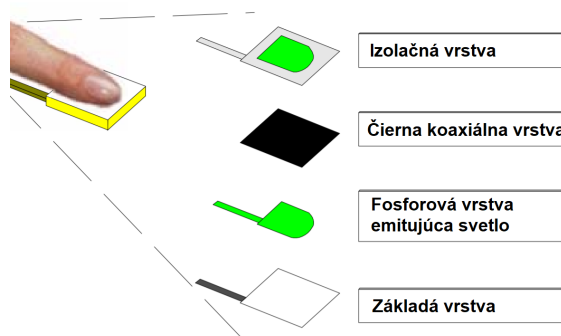
Nahradením šošovky a ochranného skla u FTIR skenerov optickými vláknami môžeme dosiahnuť značné zmenšenie ich výsledných rozmerov. Prst je v priamom kontakte s optickými vláknami, ktoré skrz svoju druhú stranu prenášajú svetlo priamo kamerám. Keďže kamera je s optickými vláknami v priamom kontakte a nie skrz šošovku ako u FTIR, musí kamera pokrývať celú plochu optických vlákien, čo má za následok vyššiu cenu týchto senzorov [13].



Obr. 3.4: Princíp optických vlákien [13].

Elektro-optické senzory

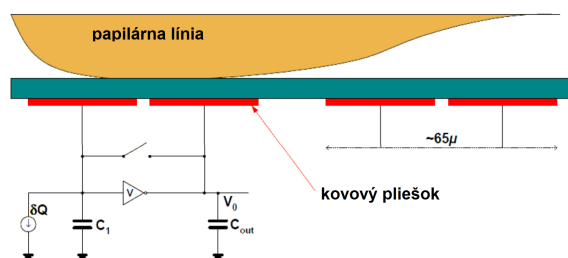
Tieto senzory sa skladajú zo štyroch vrstiev. Pritlačením prsta na vrchnú izolačnú vrstvu dochádza k spojeniu s čiernou koaxiálnou vrstvou, ktorá cez fosforovú vrstvu emituje svetlo. Keďže vrcholy papilárnych línií sa dotýkajú senzoru viac ako ostatné časti prsta, emitované svetlo je rozdielne a kopíruje štruktúru prsta [5].



Obr. 3.5: Princíp elektro-optickej technológie [5].

3.4.2 Kapacitné senzory

Tento typ senzoru sa skladá z dvojdimenzionálnej matice malých vodivých plošiek, ktorých hustota je vyššia ako hustota papilárnych línií. Po priložení prsta na senzor sa vytvárajú malé elektrické náboje, ktorých intenzita závisí na lokálnej vzdialenosti odtlačku, ktorá je v miestach papilárnych línií nižšia ako v ostatných častiach odtlačku. Na základe týchto elektrických nábojov je následne zrekonštruovaná výsledná podoba odtlačku [13].



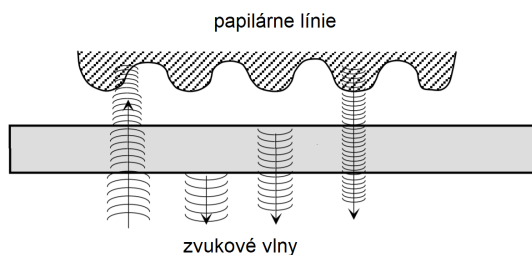
Obr. 3.6: Princíp kapacitnej technológie [5].

3.4.3 Termické senzory

Základnou zložkou týchto senzorov je pyroelektrický materiál, ktorý generuje elektrický prúd na základe teplotných rozdielov. Časti odtlačku, ktoré sú v priamom kontakte so senzorom (vrcholy papilárnych línií) generujú iné teplotné rozdiely ako zvyšné časti odtlačku. Aby bol teplotný rozdiel čo najvýraznejší, sú tieto typy senzorov spravidla umelo ohrievané na vyššiu teplotu. Keďže teploty na povrchu senzora sa rýchlo vyrovnajú, odtlačok je viditeľný len veľmi krátku dobu. Je preto nevyhnutné používať prietahové (*sweep*) senzory. Medzi hlavné výhody tohto senzoru patrí jeho odolnosť voči elektrostatickým výbojom, a možnosť chrániť senzor pomocou pomerne hrubej, teplovodivej vrstvy ochranného obalu [13].

3.4.4 Ultrazvukové senzory

Ultrazvukové senzory pozostávajú z dvoch základných komponent. Prvou je vysielač, ktorý generuje krátke akustické impulzy a druhou je prijímač, ktorý tieto impulzy po odrazení od prstu spätne prijíma. Na základe odrazených impulzov a ich časových posunov je následne možné zrekonštruovať štruktúru odtlačku. Hlavnou výhodou tejto techniky je, že ultrazvukové impulzy preniknú až pod povrch kože, a preto je snímanie týmto senzorom odolné voči povrchovým nečistotám (napríklad prach, hlina, olej...), a dokonca prenikne aj cez hrubé rukavice. Vysoká cena tejto technológie spolu s dlhou dobou snímania (v rádoch sekúnd) však spôsobili, že tieto senzory sú len málo používané [13].



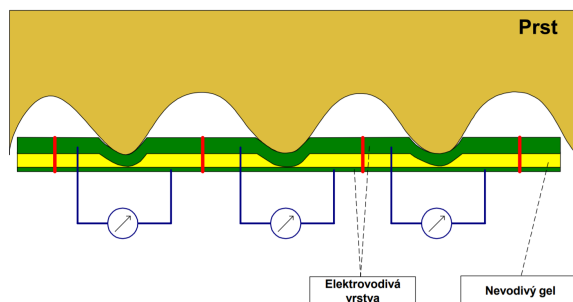
Obr. 3.7: Princíp ultrazvukovej technológie [13].

3.4.5 Tlakové senzory

Tlakové senzory, taktiež nazývané ako piezometrické, sa skladajú z dvoch elektrovodivých vrstiev oddelených vrstvou nevodivého gélu. Priložením odtlačku na plochu senzoru dôjde v miestach vrcholov papilárnych línií k deformácii nevodivého gélu a následnom spojení oboch vodivých častí, čo má za následok vytvorenie malého množstva elektrického prúdu, z ktorého je možné zrekonštruovať podobu odtlačku [13].

3.5 Faktory ovplyvňujúce kvalitu odtlačku

Neexistuje žiadna oficiálna definícia kvality odtlačku prsta. Zo všeobecného hľadiska však môžeme za kvalitný odtlačok označiť ten, ktorý má jasne rozoznateľné papilárne línie a umožňuje jednoduchú a presnú extrakciu markantov, ktoré sú následne použité v procese porovnávania.



Obr. 3.8: Princíp tlakovej technológie [5].

Kvalita odtlačkov úzko súvisí so schopnosťou biometrického systému správne ich rozoznávať. V dôsledku nedokonalostí snímacieho vybavenia, prípadne nesprávneho použitia totiž môžu vznikať odtlačky veľmi tmavé/svetlé, s nízkou úrovňou kontrastu, atď. Počty markantov nájdených u takýchto odtlačkov môžu byť značne zredukované, alebo naopak, môžu byť detekované markanty, ktoré odtlačok reálne neobsahuje. Všetky tieto skutočnosti môžu vyústiť v nízku, prípadne chybovú rozlišovaciu schopnosť biometrického systému.

Tento problém sa dá vyriešiť priradením kvality jednotlivým odtlačkom. V praxi to znamená, že u biometrických autentizačných systémov sa bezprostredne po nasnímaní odtlačku vypočíta jeho kvalita. V prípade, že kvalita nie je dostatočná, systém odtlačok ďalej spracovávať nebude, a požiada užívateľa o jeho opätovné nasnímanie [9].

Na kvalitu nasnímaných odtlačkov vplyva niekoľko faktorov, ktoré môžeme rozdeliť do nasledujúcich skupín.

3.5.1 Defekty spôsobené vlastnosťami kože

Základným predpokladom pre kvalitné nasnímanie biometrickej črty je samotná prítomnosť danej črty u človeka. Tá však môže byť u odtlačkov prstov v dôsledku rôznych chorôb značne zredukovaná, a to až na takú úroveň, že sa rozoznávanie jednotlivých odtlačkov stane prakticky nemožné. Hlavným negatívnym faktorom sú rôzne kožné ochorenia, ktoré môžu nielen zmeniť pôvodnú štruktúru odtlačku, ale spôsobujú aj nestálosť odtlačku v čase (dva rovnaké odtlačky nasnímané v určitom časovom intervale môžu mať úplne inú štruktúru) [6].

Kožné ochorenie môžeme rozdeliť do dvoch základných skupín. Prvou, najmenej závažnejšou sú choroby ovplyvňujúce len farbu kože. Jedinými ovplyvnenými senzormi sú senzory optické, ale keďže samotná štruktúra odtlačku ostane nezmenená, porovnávanie pomocou zvyšných druhov senzorov je stále možné. Do druhej, závažnejšej skupiny, radíme choroby priamo vplyvajúce na štruktúru odtlačku. V prípade takýchto chorôb v pokročilom štádiu už nie je možné daný odtlačok rozoznať ani voľným okom, ani pomocou väčšiny senzorov. Jedinými senzormi, ktoré majú šancu sú ultrazvukové senzory, ktoré snímajú hlbšiu štruktúru kože, ktorá ešte nemusí byť poškodená [4].

Kožných ochorení postihujúcich odtlačky prstov je veľké množstvo, v tejto práci sa však zameriame hlavne na dve. Prvým príkladom takéhoto častého ochorenia je ekzém, pri ktorom je koža veľmi suchá, čo má za následok jej praskanie a prípadné odlupávanie, ktoré môže viesť až k odkrytiu hlbších vrstiev kože. Pozorovaním sa zistilo, že nasnímané odtlačky s týmto poškodením majú menej kontrastné papilárne línie a obsahujú rovné čiary, ktoré sa vzájomne križujú. Druhým častým ochorením sú bradavice, ktoré predstavujú malé, zväčša

okružhle, jemne vyvýšené výrastky na koži, v ktorých sú papilárne línie nerozoznatelné (obrázok 3.9) [1].

Okrem chorôb môžu vplývať na kvalitu kože aj menej “závažné” faktory, ako napríklad jazvy, vrásky alebo pluzgiere [1].



Obr. 3.9: Príklady kožných ochorení ovplyvňujúcich odtlačky prstov, vľavo ekzém, vpravo bradavice [6].

3.5.2 Defekty spôsobené ľudským faktorom

Kvalita nasnímaného odlačka môže byť degradovaná aj nesprávnym postupom snímania, pri ktorom by sa malo dodržiavať niekoľko základných pravidiel (tie sú pre rôzne typy senzorov špecifické). Medzi typické chyby patrí napríklad pokus o overenie nesprávneho prstu, ktorý v databázi nie je uložený, použitie správneho prstu, avšak pod nesprávnym uhlom, prípadne pokus o nasnímanie špinavého prstu. Medzi ojedinelé prípady môžeme zaradiť neochotu užívateľa s nasnímaním odtlačku, čo môže viesť nielen ku všetkým vyššie spomínaným poškodeniam, prípadne rozmazaniu odtlačku, ale aj k trvalému poškodeniu senzora.

3.5.3 Defekty spôsobené prostredím

Výsledná podoba nasnímaného odtlačku môže byť ovplyvnená ako aj typom a výkonnosťou použitého senzoru, tak aj prostredím, v ktorom sa senzor nachádza. Nasleduje stručný prehľad najčastejších negatívnych okolitých faktorov.

Nečistoty

Nečistoty na snímacej ploche senzora patria medzi najčastejšie sa vyskytujúce negatívne ovplyvňujúce faktory. Typicky sa môže jednať o prach, hlinu, piesok, piliny, vlasy prípadne olej. Medzi najviac ovplyvniteľné patria kapacitné senzory (hlavne vodivými nečistotami), medzi najviac odolné patria prietahové a ultrazvukové senzory. Špeciálnym prípadom znečistenia sú latentné odtlačky - zvyšky odtlačkov po predchádzajúcom použití. Tie môžu nielen výrazne ovplyvniť aktuálne snímaný odtlačok, ale predstavujú aj bezpečnostné riziko (latentný odtlačok môže byť skopírovaný) [4]. Príklad takýchto nečistôt je na obrázku 3.10.

Svetelné podmienky

Svetelné podmienky najčastejšie ovplyvňujú optické senzory. Keďže snímacia plocha optických senzorov má spravidla podobnú veľkosť ako odtlačok samotný, okolité svetlo dopadá na senzor len minimálne a poškodenie nebýva veľké. V prípade použitia väčšieho senzora (napr. kvôli snímaniu viacerých prstov naraz) však poškodenie môže byť oveľa väčšie [4].

Elektromagnetické žiarenie

Elektromagnetické žiarenie môže byť veľmi problematické, nakoľko ovplyvňuje všetky typy senzorov a jeho pôsobenie nekončí len u snímacej plochy, ale vplýva na všetky elektronické časti, prípadne káble spájajúce senzor s jeho riadiacou jednotkou. Častými následkami je neschopnosť senzoru zaostriť na odtlačok, čo sa prejavuje výsledným rozmazaným obrazom [4]. Príklad takéhoto defektu je na obrázku 3.10.



Obr. 3.10: Odtlačky s rôznym poškodením - prvé dva predstavujú nečistoty na povrchu senzora, tretí pôsobenie silného magnetického žiarenia [17].

Vlhkosť

Ďalším častým negatívnym faktorom je snímanie príliš suchého, alebo naopak, príliš vlhkého odtlačku [10]. Keďže vlhkosť prsta úzko súvisí s jeho vodivosťou, ovplyvnené sú hlavne kapacitné senzory. Suchý odtlačok sa spravidla prejavuje nevýraznými papilárnymi líniami, často až splývajúcimi s pozadím. Naopak, vlhké odtlačky môžu mať jednotlivé papilárne línie až tak výrazné, že medzi miznú hranice [4]. Príklad príliš suchého a mokrého odtlačku je na obrázku 3.11.



Obr. 3.11: Príklady odtlačkov s rôznou úrovňou vlhkosti, vľavo príliš suchý, a vpravo príliš vlhký odtlačok. [13].

Kapitola 4

NIST Fingerprint Image Quality

National Institute of Standards and Technology (NIST) je výskumné stredisko meracích štandardov ministerstva obchodu USA. Medzi jeho hlavné ciele patrí podpora inovácií a štandardizácia technológií s ohľadom na bezpečnosť a zlepšovanie kvality života, pričom využíva širokú škálu technológií od miniatúrnych nanoprístrojov až po zemetrasenia odolné budovy a komunikačné siete.

Významnou súčasťou NIST je aj výskum biometrických systémov. Viac ako 30 rokov, NIST spolupracoval s FBI (*Federal Bureau of Investigation*) v oblasti automatického rozpoznávania odtlačkov prstov. V roku 1960 začal spolupracovať na prvej verzii systému AFIS (*Automated Fingerprint Identification System*) a postupom času túto technológiu zdokonaľoval, vyvíjal štandardy ohľadom výmeny a meraní kvality biometrických dát a budoval voľne dostupné databáze obsahujúce reálne biometrické dáta určené pre verejné testovacie účely [20].

Jednou z dôležitých projektov NIST je aj NFIQ (*NIST Fingerprint Image Quality*) - softvér na určovanie kvality odtlačkov, ktorý rozdeľuje odtlačky do piatich kvalitatívnych kategórií. V tejto práci budeme skúmať NFIQ verziu 1.0 z roku 2004. V roku 2012 už síce začal vývoj NFIQ verzie 2.0, jej vývoj však v čase písania tejto práce ešte nebol dokončený [14].

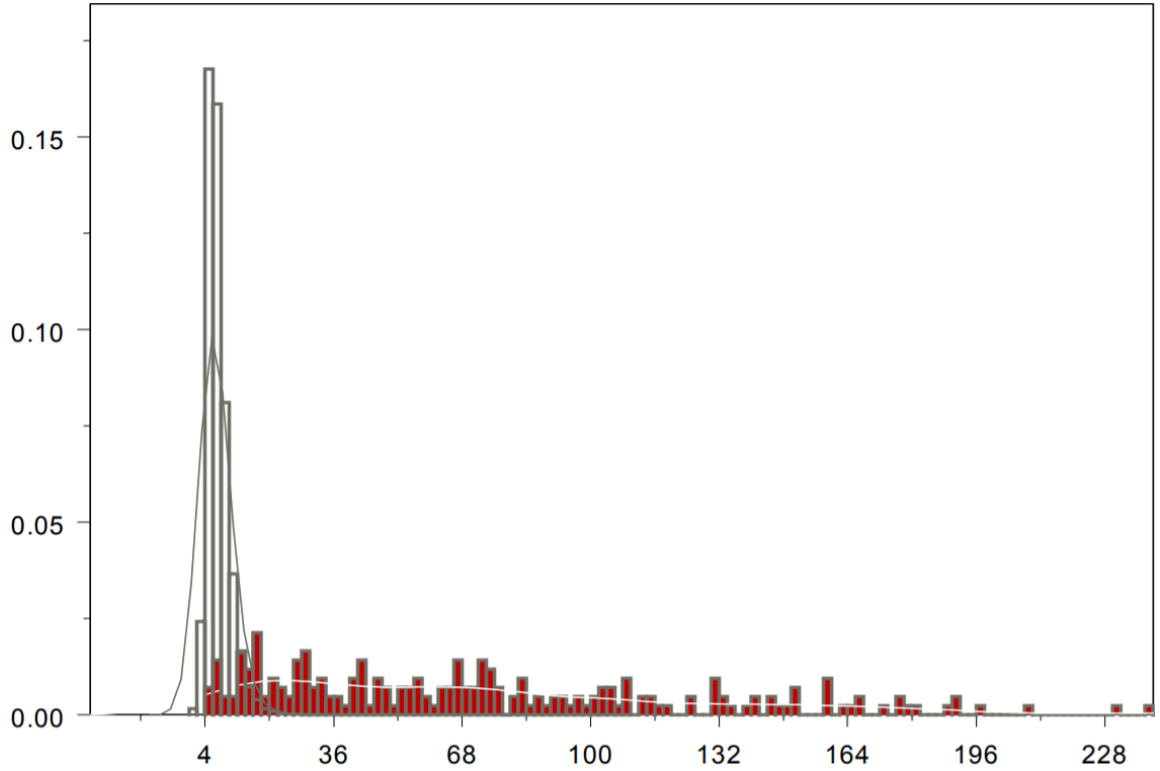
4.1 Definícia kvality

NFIQ definuje kvalitu odtlačku ako “indikátor výkonnosti porovnávača odtlačkov” [16]. Aby bolo možné tejto definícií lepšie porozumieť, ukážeme si jej princíp v širšej súvislosti.

Uvažujme databázu odtlačkov G o veľkosti k , v ktorej každý odtlačok patrí inej osobe. Potom pre každý pokus o identifikáciu odtlačkom prsta osobou už zaradenou v databázi získame skóre porovnaní, ktoré bude v $k-1$ prípadoch predstavovať *non-match scores*, a len v jednom prípade *match score*.

Táto skutočnosť je zobrazená na obrázku 4.1, na ktorom môžeme vidieť histogram rozložení dosiahnutých skóre pri porovnávaní odtlačkov 216-tich rôznych osôb voči rovnako veľkej databázi - nachádza sa tam 216 *match scores* a 46400 *non-match scores*.

Je bežné, že distribúcia *match score* je širšia ako distribúcia *non-match scores*, a nie je vylúčené, že sa tieto dve distribúcie budú prekrývať [16][18]. Prekrývanie *match* a *non-match* distribúcií však znamená, že odtlačok X_i (odtlačok X pochádzajúci od osoby i), sa pri porovnávaní s databázou nesprávne priradí k odtlačku X_j , ak skóre porovnania s odtlačkom od osoby j bude väčšie ako skóre porovnania s vlastným vzorom. Na základe



Obr. 4.1: Rozloženie *match scores* (červená farba) a *non-match scores* (biela farba) distribúcií pri reálnom porovnávaní odtlačkov [16].

týchto informácií potom môžeme povedať, že kvalitné odtlačky sú tie, ktoré pri porovnaní so svojimi vzormi dosahujú vysoké skóre, dostatočne oddelené od *non-match scores*. Naopak, nízku kvalitu môžeme priradiť odtlačkom dosahujúcim pri porovnaní so svojimi vzormi nízke skóre, prekrývajúce sa s hodnotami *non-match scores*. Preto môžeme kvalitu jednotlivých odtlačkov z databáze označiť ako mieru, v akej je CDF¹ *match-scores* oddelená od CDF *non-match scores*. Kvalitu $q(X_i)$ biometrického vzorku X_i vzhľadom na galériu G môžeme teda vyjadriť ako:

$$q(X_i) = \frac{S_m(X_i) - E(S_n(X_{ij}))}{\delta(S_n(X_{ij}))} \quad (4.1)$$

kde $S_m(X_i)$ predstavuje *match score*, $E(S_n(X_{ij}))$ predstavuje priemernú hodnotu všetkých *non-match scores* vzorku X_i , a $\delta(S_n(X_{ij}))$ predstavuje smerodatnú odchýlku všetkých *non-match scores* vzorku X_i . Jednoducho povedané, porovnáваме *match score* daného vzorku so všetkými *non-match scores* a dostaneme hodnotu, ktorej veľkosť je priamoúmerná veľkosti rozdielu medzi nimi. Preto budú vyššie hodnoty predstavovať kvalitnejší odtlačok.

Vzhľadom na fakt, že pre porovnávače odtlačkov je výhodnejšie vedieť stupeň kvality (napr. nízka, stredná, vysoká) ako jej presnú hodnotu, je hodnota kvality z rovnice 4.1 klasifikovaná do niekoľkých tried [16][18]. Výskumami v NIST bolo zistené, že aj pre porovnávač odtlačkov, ktorý je na ich kvalitu veľmi citlivý, nemá význam odtlačky deliť do viac ako ôsmich až desiatich tried. U menej citlivých porovnávačov dokonca stačia triedy len tri. NIST preto ako kompromis rozdelil odtlačky do piatich tried. Jednotlivé triedy

¹Kumulatívna distribučná funkcia

sú určené hodnotou $q(X_i)$ z rovnice 4.1, respektívne tým, do rozsahu ktorej triedy daná hodnota patrí. Rozsahy boli na základe pozorovaní NIST udané pomocou kumulatívnych distribučných funkcií *non-match scores* (W) a *match scores* (C), s presnými hodnotami zobrazenými v tabuľke 4.1.

Trieda kvality	Rozsah
1 (excellent)	($C^{-1}(0.6), C^{-1}(1)$]
2 (very good)	($C^{-1}(0.2), C^{-1}(0.6)$]
3 (good)	($C^{-1}(0.05), C^{-1}(0.2)$]
4 (fair)	($C^{-1}(0.75), C^{-1}(0.05)$]
5 (poor)	[$0, W^{-1}(0.75)$]

Tabuľka 4.1: Rozsahy jednotlivých kvalitatívnych tried NFIQ [16].

4.2 Meranie kvality

V sekcii 4.1 sme ukázali, ako je možné zmerať kvalitu odtlačku v kontexte databáze, v ktorej sa nachádza. V reálnych prípadoch však databázu väčšinou nepoznáme, a preto je treba zaviesť samostatné hodnotenie odtlačku, ktoré sa skladá z dvoch krokov. Prvým je výpočet vektora rysov (*feature vektor*), ktorý bude na základe vizuálnych vlastností odtlačku opisovať jeho charakteristické črty (rovnica 4.2). Druhým krokom je namapovanie tohto vektora na jednu z kvalitatívnych tried NFIQ pomocou neurónovej siete (rovnica 4.3).

$$V_i = L(X_i) \quad (4.2)$$

$$Q(X_i) = I(V_i) \quad (4.3)$$

4.2.1 Vektor rysov

Programy použité na vypočítanie vektora rysov (implementácia algoritmu pre výpočet rovnice 4.2) pochádzajú zo sady programov NFIS (*NIST Fingerprint Image Software*)[8]. Dôležitou časťou je program MINDTCT, ktorý má za úlohu detekovať jednotlivé markanty odtlačku a zostaviť mapu, ktorá bude odrážať jeho vizuálnu kvalitu. Odtlačok je analyzovaný lokálne, tzn. vstupný obrázok sa rozdelí na bloky 8×8 pixelov a pre každý blok sa vypočíta jeho kvalita, pričom všetky pixely vnútri jedného bloku budú mať priradenú rovnakú výslednú hodnotu. Tá je spočítaná na základe niekoľkých ďalších máp, konkrétne mapy orientácií (*orientation map*), mapy nejasnej štruktúry (*low flow map*), mapy nízkeho kontrastu (*low contrast map*) a mapy vysokého zakrivenia (*high curve map*) [18][16].

Vstupný obrázok

Formát vstupného obrázka odtlačku je pomerne obmedzený, striktne vyžaduje aby bol obrázok čiernobiely s 8 bitovou hĺbkou farieb (256 odtieňov šedej), pričom sa odporúča rozlíšenie 500 ppi (19.6 pixelov na milimeter). Vzhľadom na to, že rôzne skenery odtlačkov produkujú obrázky rôznych formátov, obsahuje NFIS balíček program CJPEG, ktorý je určený na konverziu obrázkov do požadovaného formátu [8].

Mapa orientácií

Účelom tejto mapy je zobrazíť lokálne smery papilárnych línií v jednotlivých častiach odtlačku. Výpočet prebieha pomocou diskkrétnej Fourierovej transformácie (DFT), a jej výstupom sú hodnoty v rozmedzí 0° až 179° pre jednotlivé časti odtlačku. V prípade, že v určitej časti odtlačku nie je možné určiť smery línií, je ich smer odvodený podľa okolitých častí odtlačku [18].

Mapa nejasnej štruktúry

Predstavuje časti obrázku, podľa ktorých nie je možné určiť smery papilárnych línií, a ich hodnoty v mape orientácií museli byť spočítané na základe okolia. Typicky sa jedná o časti s nízkou vizuálnou kvalitou [16].

Mapa nízkeho kontrastu

V niektorých prípadoch môže byť detekcia dominantných orientácií časti odtlačkov pomerne zložitá a to hlavne v oblastiach s nízkym kontrastom, ktoré sú rozmazané, prípadne obsahujú pozadie. Detekcia takýchto častí obrázka je dôležitá, pretože v nich umožňuje nebrať v úvahu smery orientácií z predchádzajúcej mapy orientácií, nakoľko tieto údaje nemusia byť spoľahlivé.

Mapa nízkeho kontrastu je binárna mapa jednotlivých blokov odtlačku, ktorá vyznačuje časti s nízkym kontrastom. Jej hlavným účelom je odlišenie samotného odtlačku od pozadia obrázku.

Algoritmus použitý na výpočet tejto mapy pracuje na princípe porovnávania distribúcií úrovni šedej farby. Oblasti s dobre rozlíšiteľnými papilárnymi líniami, resp. s vysokým kontrastom, musia obsahovať širokú škálu intenzít šedej (od čo najtmavšej farby v strede pap. línie po čo najbledšiu farbu medzi nimi), čiže rozloženie distribúcie farieb by malo byť široké. Naopak, u oblastí s nízkym kontrastom bude distribúcia farieb pomerne úzka. Hodnota minimálnej požadovanej šírky distribúcie farieb bola odvodená pozorovaniami z reálnych odtlačkov a pre 8 bitovú hĺbku farieb bola určená hodnotou 10. To znamená, že ak sa v časti obrázka nenachádza viac ako 10 rôznych odtieňov šedej, je daná časť označená za nízko kontrastnú [16][18].

Mapa vysokého zakrivenia

NIST vo svojich výskumoch zistilo, že ďalšími oblasťami, v ktorých detekcia markantov nie je presná, sú oblasti s vysokým zakrivením papilárnych línií, ktoré sa vyskytujú hlavne v oblastiach délt a jadri odtlačkov. Detekcia spočíva v počítaní zmien orientácií jednotlivých blokov a ich bezprostredných susedných blokov, vypočítaných pomocou mapy orientácie [18].

Mapa kvality

Výsledná mapa kvality vznikne ako zlúčenie 4 vyššie sponínaných máp (mapa orientácií, mapa nejasnej štruktúry, mapa nízkeho kontrastu a mapa vysokého zakrivenia), z ktorých každá znázorňuje iné kvality/nedostatky odtlačku. Má priradených 5 hodnôt, od najhoršej kvality s hodnotou 0 až po najvyššiu s hodnotou 4. Presný popis výpočtu výsledných hodnôt sa v oficiálnej dokumentácii síce neuvádza, analýzou zdrojových kódov sa však dá dospieť k nasledujúcim záverom:

- **Kvalita 0** - bloky, ktoré sú označené ako nízkokontrastné, alebo bloky, v ktorých nebolo možné vypočítať orientácie. Bloky tejto kvality sú nepoužiteľné, a spravidla reprezentujú pozadie.
- **Kvalita 1** - bloky, ktoré sú označené v mape nejasnej štruktúry, alebo bloky s vysokým zakrivením pap. línií, ktoré susedia s blokom kvality 0.
- **Kvalita 2** - bloky, ktoré sú označené v mape nejasnej štruktúry, alebo bloky s vysokým zakrivením pap. línií, ktoré však nesusedia s blokom kvality 0.
- **Kvalita 3** - bloky, ktoré nie sú vyznačené ako chybné v žiadnej mape, ale susedia s blokom kvality nižšej ako 3.
- **Kvalita 4** - bloky, ktoré nie sú vyznačené ako chybné v žiadnej mape a zároveň susedia len s blokmi kvality 3 alebo 4.

Detekcia a určenie kvality markantov

Súčasťou výpočtu vektora rysov je aj detekcia markantov. Tá spočíva v podrobnom skenovaní obrázka a hľadaní špecifických vzorov, ktoré indikujú buď ukončenie, alebo rozdvojenie papilárnej línie [8].

Vzhľadom na minimalizáciu počtu nedetekovaných markantov je algoritmus detekcie pomerne benevolentný, čo má za následok veľké množstvo falošných detekcií. Patria medzi ne napríklad rôzne ostrovy, jazerá, háky, prekrytia, prípadne póry. MINDCT balíček síce obsahuje funkcie na ich odstránenie, nemusia mať však 100% úspešnosť. NIST sa preto rozhodol pre robustné hodnotenie kvality jednotlivých markantov, ktoré má za úlohu priradiť falošným markantom menšiu váhu [16].

Kvalita jednotlivých markantov pozostáva z dvoch hlavných faktorov. Prvým faktorom je kvalita odtlačku v bode markantu (hodnota mapy kvality v danom bode, v rozmedzí 0 (najhoršia) až 4 (najlepšia)). Druhý faktor pozostáva zo strednej a štandardnej odchýlky intenzít šedej farby v najbližšom okolí markantu, ktoré je stanovené na 11 pixelov. Za markant vysokej kvality sa považuje ten, ktorý sa nachádza v oblasti vysokého kontrastu. Tá je NFIQ definovaná ako oblasť so strednou odchýlkou intenzity šedej okolo hodnoty 127 a smerodatnej odchýlky väčšej ako 63 [18]. Matematicky zapísane:

$$F_{\mu} = 1.0 - \frac{|\mu - 127|}{127} \quad (4.4)$$

$$F_{\sigma} = \begin{cases} 1.0 & \text{ak } \sigma > 64 \\ \frac{\sigma}{64} & \text{inak} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$R = \min(F_{\mu}, F_{\sigma}) \quad (4.6)$$

$$Q = \begin{cases} 0.50 + (0.49 * R) & \text{ak } L = 4 \\ 0.25 + (0.24 * R) & \text{ak } L = 3 \\ 0.10 + (0.14 * R) & \text{ak } L = 2 \\ 0.05 + (0.04 * R) & \text{ak } L = 1 \\ 0.01 & \text{ak } L = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

	Názov	Popis
1	<i>foreground</i>	počet blokov s kvalitou väčšou ako 0 - reprezentuje časť obrázku, na ktorom sa nachádza samotný odtlačok (nie pozadie)
2	<i>total num of minutia</i>	celkový počet markantov bez ohľadu na ich kvalitu.
3	<i>min05</i>	počet markantov s kvalitou 0.5 alebo vyššou
4	<i>min06</i>	počet markantov s kvalitou 0.6 alebo vyššou
5	<i>min075</i>	počet markantov s kvalitou 0.75 alebo vyššou
6	<i>min08</i>	počet markantov s kvalitou 0.8 alebo vyššou
7	<i>min09</i>	počet markantov s kvalitou 0.9 alebo vyššou
8	<i>quality zone 1</i>	percentuálny podiel blokov mapy kvality s kvalitou 1 z celkového počtu blokov popredia (foreground)
9	<i>quality zone 2</i>	percentuálny podiel blokov mapy kvality s kvalitou 2 z celkového počtu blokov popredia (foreground)
10	<i>quality zone 3</i>	percentuálny podiel blokov mapy kvality s kvalitou 3 z celkového počtu blokov popredia (foreground)
11	<i>quality zone 4</i>	percentuálny podiel blokov mapy kvality s kvalitou 4 z celkového počtu blokov popredia (foreground)

Tabuľka 4.2: Jednotlivé zložky vektora rysov [16].

kde μ predstavuje priemernú, a σ smerodajnú odchylku odtieňov šedej, a Q predstavuje výslednú hodnotu kvality daného markantu v rozmedzí od 0.01 (najhoršia) do 0.99 (najlepšia).

Vektor rysov

Vyššie spomínané merania jednotlivých kvalitatívnych zložiek sú zhrnuté do jedného 11-dimenzionálneho vektora rysov, ktorý v sebe odráža ako aj charakter mapy kvality, tak aj počet a kvalitu jednotlivých markantov. Jednotlivé zložky vektora rysov sú zobrazené v tabuľke 4.2.

4.2.2 Mapovanie vektora rysov

Pozorovaním bolo zistené, že medzi vektorom rysov a triedou kvality jeho odtlačku definovavou v sekcii 4.1 nie je žiadna lineárna súvislosť. Zostaviť nelineárne mapovanie je však veľmi ťažká úloha, a preto ňou bola poverená práve neurónová sieť. Konkrétne bola zostavená trojstupňová neurónová sieť, ktorej vstupom je vektor rysov, a výstupom hodnota NFIQ kvality (1 - 5). Dôležitou časťou každej neurónovej siete je jej tréning, resp. upravovanie váh jednotlivých vstupných zložiek (častí vektora rysov) tak, aby výsledky odpovedali očakávaniam. Na tréning tejto neurónovej siete bolo použitých 3400 odtlačkov, ktoré boli dôsledne vybrané tak, aby rovnomerne reprezentovali všetky ich druhy [16].

4.3 Analýza funkčnosti

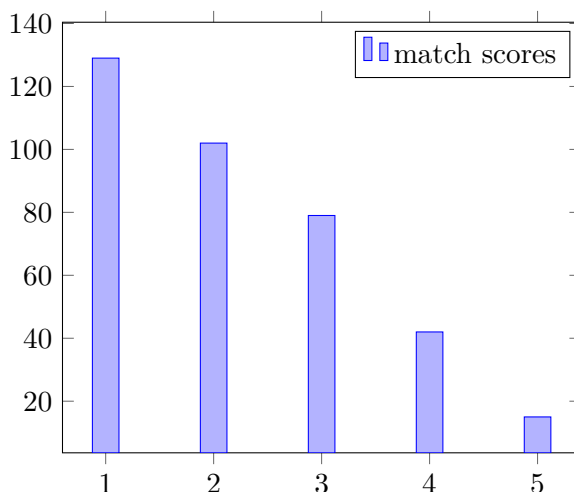
NFIQ síce nehodnotí kvalitu odtlačku podľa jeho vizuálnej kvality, testovanie však potvrdilo, že odtlačky s jasne viditeľnými papilárnymi líniami, ktoré môžeme subjektívne ohodnotiť ako kvalitné, dosahujú v priemere lepšie NFIQ výsledky ako tie, ktoré môžeme

subjektívne ohodnotiť ako vizuálne nekvalitné. Vizuálna variabilita jednotlivých tried je však pomerne vysoká, napríklad v NFIQ triede 1 môžeme nájsť aj odtlačky, ktoré majú veľkú časť svojej plochy nejasnú, a nie je v nej možné rozoznať jednotlivé papilárne línie, prípadne identifikovať markanty. Naopak, v NFIQ triede 3 môžeme nájsť aj odtlačky s jasne viditeľným líniami, ktoré by sme mohli subjektívne zaradiť do lepšej triedy. Odhadovanie kvalitatívnych NFIQ tried 1 až 4 je tým pádom pomerne nepresné, s vysokou úspešnosťou sa však dajú odlíšiť odtlačky najhoršej, piatej kategórie. Ukážky odtlačkov z jednotlivých tried sú zobrazené v prílohe A.

4.3.1 Analýza výkonnosti porovnávača odtlačkov

NFIQ definuje kvalitu odtlačku ako “indikátor výkonnosti porovnávača odtlačkov”. Z toho vyplýva, že odtlačky patriace do lepšej kvalitatívnej kategórie by mali pri porovnávaní so svojimi vzormi dosahovať vyššie skóre podobnosti, ako odtlačky horšej kvalitatívnej kategórie. Táto skutočnosť bola otestovaná na voľne dostupnej databázi, konkrétne NIST Special Database 4 [15]. Tá obsahuje 2000 párov odtlačkov v rozlíšení 512×512 pixelov s 8 bitovou hĺbkou farby, rovnomerne rozložených pre každú triedu odtlačku - *whorl*, *left loop*, *right loop*, *arch* a *tended arch* (400 párov odtlačkov pre každú triedu).

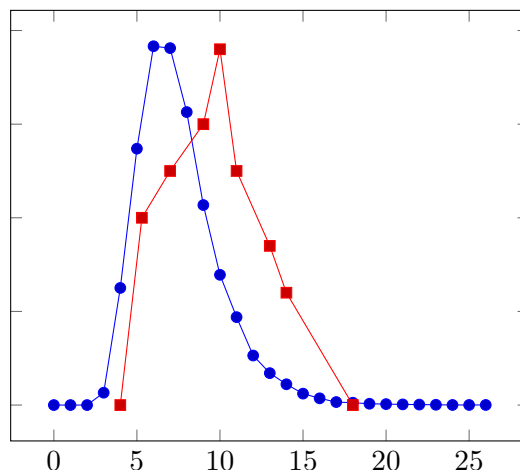
Porovnanie odtlačkov a počítanie ich podobnostného skóre bolo uskutočnené pomocou programu BOZORTH3 [8], ktorý porovnáva odtlačky na základe ich markantov vypočítaných pomocou MINDTCT softwaru. Aby boli čo najpresnejšie nasimulované podmienky odporúčané podľa NIST, porovnávali sa len tie páry odtlačkov, z ktorých aspoň jeden bol NFIQ kvality 1, a mohol predstavovať kvalitný referenčný vzor v biometrickom systéme. Priemerné skóre dosiahnuté jednotlivými NFIQ triedami odtlačkov pri porovnaní s ich vzormi je znázornené na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Priemerné skóre dosiahnuté jednotlivými NFIQ triedami odtlačkov pri porovnaní s ich vzormi NFIQ kvality 1.

Z obrázku 4.2 je vidieť, že odtlačky lepšej NFIQ kvality skutočne dosahujú vyššie priemerné NFIQ skóre, ako odtlačky nižšej kvality. Všetky odtlačky kvalít 1 až 4 dosiahli v teste dostatočne dobré skóre na to, aby mohli byť v kontexte testovanej databázy navzájom jednoznačne identifikovateľné. Jediné odtlačky, ktoré sa môžu pri identifikácii stotožniť s

nesprávnym vzorom (v dôsledku niektorých *non-match scores* vyšších, ako je samotné *match score*), sú odtlačky piatej kategórie, ktorých prekrývajúce sa *match* a *non-match* distribúcie sú zobrazené na obrázku 4.3. Z hľadiska výkonnosti porovnávača odtlačkov na databázi *NIST Special Database 4* teda môžeme NFIQ označiť za plne funkčné riešenie.



Obr. 4.3: Znáznornenie rozložení *non-match* distribúcií všetkých odtlačkov (modrá farba) a *match* distribúcií odtlačkov NFIQ kvality 5 (červená farba), na základe porovnávača odtlačkov BOZORTH3 a databáze NIST Special Database 4.

4.3.2 Analýza dopadu poškodenia odtlačku na kvalitu

Jednou zo základných funkcií požadovaných od hodnotenia kvality je detekcia nízkej kvality u rôzne poškodených odtlačkov, a následné zamedzenie ich ďalšieho spracovávania. Typickým príkladom sú odtlačky poškodené chorobou. Tie môžu často spôsobovať neustále menenie štruktúry odtlačku v čase, a preto sú nimi postihnuté odtlačky vyslovene nevhodné pre akékoľvek porovnávacie účely [1].

Prvou testovanou skupinou bola databáza 200 odtlačkov poškodených rôznymi chorobami pochádzajúcich z internej databáze Fakulty informačných technológií Vysokého učenia technického v Brne. Ich NFIQ skóre bolo porovnané so zdravými odtlačkami pochádzajúcich z voľne dostupnej databáze NIST Special Database 4 (tabuľka 4.3).

	priemerná hodnota	medián	smerodátňá odchylka
Zdravé odtlačky	2,25	2	1,70
Poškodené odtlačky	4,16	4	1,08

Tabuľka 4.3: Porovnanie NFIQ skóre zdravých a chorých odtlačkov prstov.

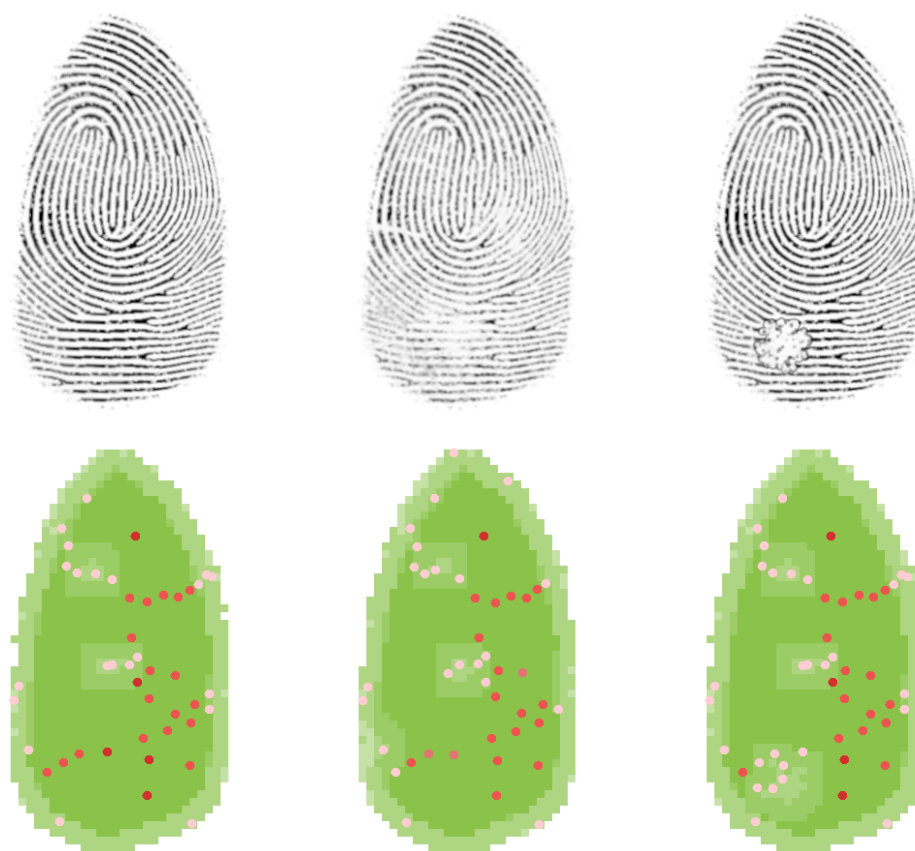
Z tabuľky 4.3 vyplýva, že zdravé odtlačky dosahujú v priemere skóre 2.25 (*very good*), odtlačky postihnuté chorobou dosahujú v priemere podstatne horšie skóre 4.16 (*fair*). Na prvý pohľad teda môžeme povedať, že výsledky odpovedajú očakávaniam.

Toto porovnanie je však len orientačné a treba ho brať s nadhľadom. Jednak ide o dve rôzne databázy nasnímané senzormi rôznej kvality za rôznych podmienok, a taktiež nemáme žiadne informácie o kvalite odtlačku, keby sa na ňom nevyskytla choroba. Reálny dopad choroby teda zmerať nemôžeme. Pre účel priameho skúmania dopadu chorôb na jednotlivé

odtlačky boli použité syntetické odtlačky vygenerované pomocou softwaru SFinGe², do ktorých boli následne za účelom zhoršenia kvality vgenerované poškodenia pomocou programu z diplomovej práce Ing. Bártý (konkrétne bradavice a ekzém) [2]. Výsledky sú zobrazené v tabuľke 4.4.

	priemerná hodnota	medián	smerodatná odchylka
Pôvodné odtlačky	1,73	2	0,44
Odtlačky s ekzémom	1,55	1	0,59
Odtlačky s bradavicami	1,46	1	0,55

Tabuľka 4.4: Porovnanie dosiahnutých NFIQ skóre syntetických odtlačkov programu SFinGe, do ktorých boli vgenerované poškodenia programom z diplomovej práce Ing. Bártý [2].



Obr. 4.4: Odtlačok prstu NFIQ kvality 2, ktorého kvalita sa po dogenerovaní poškodení zvýšila na 1. Pod každým odtlačkom je znázornená jeho príslušná mapa kvality - sýtejšia zelená farba predstavuje kvalitnejšiu časť odtlačku. Body predstavujú markanty, ktorých intenzita červenej farby je priamoúmerná ich kvalite.

Výsledky sú pomerne prekvapivé. Namiesto aspoň jemného zhoršenia NFIQ skóre sa však skóre väčšiny odtlačkov zlepšilo, čo je rozhodne nežiaduca a nesprávna funkcionálna. Na ob-

²SFinGe (Synthetic Fingerprint Generator) je aplikácia umožňujúca generovanie syntetických odtlačkov prsta, vytvorená na Boloňskej univerzite.

rázku 4.4 je uvedený príklad odtlačku NFIQ kvality 2, ktorý v prípade dogenerovania oboch ochorení zvýšil svoju kvalitu na 1. Na základe vektora rysov pre túto trojicu odtlačkov uvedených v tabuľke 4.5 je vidieť, že obsahujú len minimálne rozdiely - u odtlačku s ekzémom sa jemne znížila kvalita markantov a u odtlačku s bradavicou sa približne piatim percentám odtlačku znížila kvalita zo 4 na 3 a dokonca uňho pribudlo zopár nových markantov. Pre zistenie príčiny, prečo vektor rysov nereflektuje poškodenia odtlačku výraznejšie, je treba analyzovať jednotlivé časti jeho výpočtu. Nasleduje ich stručná analýza, kompletne grafické znázornenie všetkých jednotlivých častí výpočtu je obsiahnuté v prílohe B.

Mapy orientácií všetkých troch odtlačkov sa zhodnú a odpovedajú zdravému odtlačku. Program udáva smery papilárnych línií ako aj v oblasti ekzému s nízkym kontrastom, tak aj v oblasti bradavice, kde sa síce papilárne línie nenachádzajú, ale ich smer je možné odhadnúť podľa okolia.

Vzhľadom na nízky kontrast postihnutých oblastí by sa mohlo očakávať, že sa ich nedostatky prejavujú v mape nízkeho kontrastu. Tak sa ale nestalo, a všetky 3 mapy sú identické, bez najmenej známky poškodenia. Pravdepodobne za to môže veľmi benevolentne nastavená hodnota prahu detekcie nízkeho kontrastu - na označenie časti odtlačku za kontrastne dostačujúcu totiž stačí, aby histogram odtieňov šedej v oblasti o veľkosti 8×8 pixelov obsahoval z 256 možných odtieňov len 10.

Všetky mapy vysokého zakrivenia sú tiež zhodné a nedetekujú žiadne problémy. Jedinou časťou výpočtu detekujúcej nedostatky odtlačku je mapa nejasnej štruktúry, ktorá zachytila celú bradavicu a časť poškodenia spôsobeného ekzémom.

	Vektor rysov											
Zdravý odtlačok	1186	44	23	23	14	0	0	0.02	0.24	0.10	0.62	
Odtlačok s ekzémom	1182	43	21	18	01	0	0	0.03	0.23	0.11	0.61	
Odtlačok s bradavicou	1186	48	20	20	11	0	0	0.02	0.26	0.15	0.55	

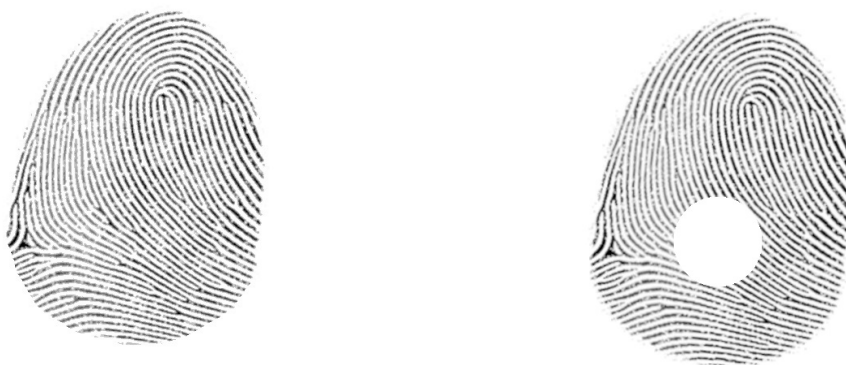
Tabuľka 4.5: Príklad vektorov rysov patriacich syntetickému odtlačku vygenerovanému pomocou SFinGe, do ktorého boli vgenerované poškodenia programom Ing. Bártý [2].

4.3.3 Zhrnutie

Na základe predchádzajúcich pozorovaní môžeme zhodnotiť, že v prípade reálnych, nepoškodených odtlačkov NFIQ funguje správne a určite bude prínosom pre biometrický systém. V prípade poškodených odtlačkov však nemusí fungovať úplne správne, a v dôsledku malých poškodení odtlačku (znížený jas, prerušenie papilárnych línií) sa môže dokonca NFIQ skóre zlepšiť. Pozorovaním v predchádzajúcej kapitole sa zistilo, že vektor rysov v sebe niektoré nedokonalosti neodráža, čiže neurónová sieť ani nemá šancu dané nedokonalosti detekovať, respektívne ich previesť do podoby zhoršeného hodnotenia odtlačku.

Zásadným problémom vektora rysov je, že pomocou údajov, ktoré v sebe obsahuje, nie je niektoré negatívne vlastnosti odtlačku ani len technicky možné zobrazit. Príkladom môže byť konzistencia odtlačku (vlastnosť ktorá udáva, či je odtlačok nasnímaný ako jeden celok, bez prerušení). Na obrázku 4.5 sú znázornené dva pôvodne totožné odtlačky, pričom do odtlačku vpravo bol vkreslený kruh, a odtlačok vľavo bol zmenšený o plochu odpovedajúcu kruhu tak, aby vzory papilárnych línií zaberali rovnakú plochu u oboch odtlačkov. Kruh v pravom odtlačku síce rozhodne predstavuje nedokonalosť (choroba, poškodený senzor...), z hľadiska NFIQ vektora rysov sú však oba odtlačky takmer identické - obsahujú

rovnaký počet blokov popredia s podobnými kvalitatívnymi pomermi, a taktiež podobný počet detekovaných markantov. Iné informácie vektor rysov neobsahuje.



Obr. 4.5: Príklad dvojice odtlačkov, ktoré sú z hľadiska NFIQ takmer identické. Oba dosiahli skóre kvality 2 na základe nasledujúcich vektorov rysov:

ľavý odtlačok:	1805		61		34		34		21		0		0		0.02		0.18		0.06		0.72
pravý odtlačok:	1805		73		28		28		16		0		0		0.02		0.19		0.08		0.69

Ďalšou nevýhodou NFIQ je jeho pomerne benevolentné hodnotenie vizuálnej kvality odtlačku, čo sa prejavuje hlavne u odtlačkov s nízkym kontrastom. Na obrázku 4.6 sú znázornené dve rovnaké časti rovnakého odtlačku, pričom jeden je viditeľne horšej vizuálnej kvality ako druhý. Podľa NFIQ však obe časti odtlačkov dosahujú maximálnej vizuálnej kvality, aj keď nízky kontrast na odtlačku vpravo môže spôsobiť nedetekovanie niektorých markantov, alebo naopak, detekciu falošných markantov.



Obr. 4.6: Dvojica častí rovnakého odtlačku pred a po vgenerovaní poškodenia, obe dosahujú podľa NFIQ maximálnu vizuálnu kvalitu.

Kapitola 5

Návrh novej metodiky hodnotenia kvality odtlačku

Vzhľadom na nápravu vyššie spomínaných nedostatkov NFIQ bude v tejto práci vytvorená nová metodika hodnotenia kvality, ktorá bude založená na vizuálnej kvalite odtlačku a bude hodnotiť nielen vernosť zobrazenia odtlačku voči skutočnosti, ale zároveň bude vedieť detekovať aj rôzne jeho poškodenia. Výsledná kvalita bude pozostávať z viacerých faktorov, ktorým budú na základe pozorovaní priradené rôzne váhy. Očakáva sa, že hodnotenie pomocou tejto metodiky dokáže vyriešiť nedostatky NFIQ, a zároveň bude poskytovať oveľa jemnejšie kvalitatívne informácie. Nasleduje stručný prehľad požiadaviek na kvalitu, za ktorým bude nasledovať ich implementácia.

Zreteľnosť papilárnych línií

Za kvalitné odtlačky budeme považovať tie, ktorých papilárne línie sú jasne viditeľné, čiže ľahko rozlíšiteľné ako aj od pozadia, tak aj od ostatných línií. Jasne identifikovateľné papilárne línie totiž zaručujú spoľahlivú detekciu markantov a tým pádom aj presnejšie porovnávanie jednotlivých odtlačkov. Dobrá vizuálna kvalita takisto zaistí minimalizovanie detekcií falošných markantov. Za ideálnych podmienok by mali stredy pap. línií dosahovať maximálny odtieň čiernej, a naopak, medzery medzi nimi by mali dosahovať hodnoty opačné. Požadovanou vlastnosťou teda je, aby rozpätie hodnôt odtieňov čiernej bolo čo najväčšie. Toto rozpätie môžeme následne vyjadriť percentuálne vzhľadom na celkové požadované rozpätie. Príklad kontrastnej a nekontrastnej časti odtlačku je znázornený na obrázku 4.6.

Kontinualita papilárnych línií

Ďalšou sledovanou vlastnosťou papilárnych línií bude ich kontinualita, resp. prerušenia. Nedokonalosti pap. línií sú síce veľmi dôležité a majú významnú rolu pri porovnávaní odtlačkov, ich nadmerný výskyt v malej časti odtlačku však môže signalizovať problém (napr. nedostatočne pritlačený prst na plochu senzora). Kontinualitu pap. línií budeme v ich častiach hodnotiť znova percentami, ktorých vysoká hodnota bude signalizovať dlhé, neprerušované štruktúry pap. línií, a naopak, ich nízka hodnota bude signalizovať časté prerušenia, prípadne nejasnú štruktúru. Príklad častí odtlačkov s rozdielnou kontinualitou je zobrazený na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Dvojica častí odtlačkov s rozdielnou kontinualitou papilárnych línií.

Konzistentnosť odtlačku

Aby sme sa vyvarovali rovnakým chybám ako NFIQ (príklad na obrázku 4.5), je nutné takisto skontrolovať aj rozloženie odtlačku vo vstupnom obrázku. Za konzistentný odtlačok budeme považovať ten, ktorý vo vnútri svojich hraníc nebude nijak prerušený, čiže bude obsahovať súvislé striedania papilárnych línií. Každé prerušenie odtlačku vo vnútri jeho hraníc následne nemôže byť považované za pozadie a tak nezohľadnené vo výslednom hodnotení, ale musí mu byť priradená penalizácia. Príklad reálneho odtlačku obsahujúceho 5% nekonzistentnosti je znázornený na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Príklad nekonzistentného odtlačku s prerušením o veľkosti 5%.

Veľkosť odtlačku

Pri porovnávaní odtlačkov je okrem kvality štruktúry taktiež veľmi dôležité sledovať aj jeho veľkosť. Príliš malé odtlačky by totiž nemuseli obsahovať dostatočné množstvo markantov pre jeho spoľahlivé porovnanie. Zakým NFIQ priamo detekuje markanty a pozná ich počet, náš návrh s detekciou markantov neráta, čiže musíme odvodiť veľkosť odtlačku inak. Prvou uvažovanou metódou odvodenia veľkosti bolo spočítať pixely patriace odtlačku. Vzhľadom na to, že program bude schopný spracovávať odtlačky obrázkov rôznych rozlíšení (ppi), a detekcia rozlíšenia nemusí byť vždy dostatočne spoľahlivá (hlavne u menej kvalitných odtlačkov), od tejto metódy sa upustilo. Za vhodnú metódu bolo nakoniec vybrané percentuálne vyjadrenie plochy odtlačku vzhľadom k celkovej ploche obrázku. Za dostatočne veľký odtlačok sa bude považovať ten, ktorý bude rozložený aspoň na 20% plochy obrázka.

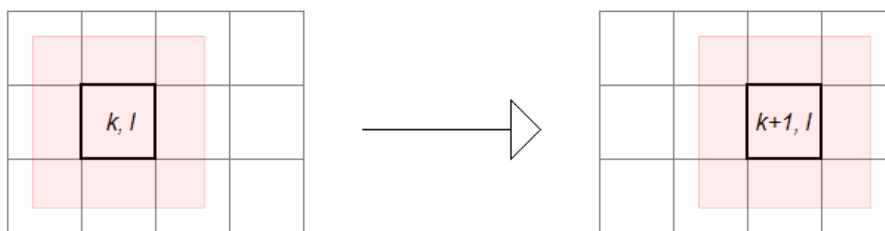
5.1 Vstupný obrázok

Podobne ako NFIQ, navrhnutý algoritmus bude interne pracovať s čiernobielymi obrázkami odtlačkov s farebnou hĺbkou 256 bitov s rozlíšením 200 až 1000 ppi. Nemôžeme však predpokladať, že vstupný obrázok bude mať vždy požadovaný formát, preto je vstup vždy skontrolovaný a v prípade potreby automaticky prevedený do odpovedajúceho čiernobieleho formátu, kde sa každý pixel C prepočíta nasledujúcim spôsobom:

$$C_{i,j} = 0.2126 \times R_{i,j} + 0.7152 \times G_{i,j} + 0.0722 \times B_{i,j} \quad (5.1)$$

kde C predstavuje výslednú čiernobielu farbu pixelu na základe odpovedajúcej červenej, zelenej a modrej zložky pôvodnej farby, a i, j predstavujú súradnice pixelu.

Následne je odtlačok rozdelený na bloky rovnakej veľkosti, ktoré sa spracovávajú nezávisle. Veľmi dôležité je vybrať správnu veľkosť bloku - bloky by mali byť čo najmenšie, aby sme dosiahli čo najvyššie rozlíšenie kvality, zároveň by však mali byť dostatočne veľké na to, aby mohli obsiahnuť dostatok informácií potrebných na presné určenie lokálnej kvality. Takisto je žiaduce, aby sa informácie o okolitých blokoch aspoň čiastočne prejavili v práve spracovávanom bloku a umožnili tak plynulejšie prechody medzi kvalitami jednotlivých blokov. Ako vhodné riešenie sa ukázala implementácia plávajúceho okna, ktoré bude mať stred v práve spracovávanom bloku, a zároveň bude väčšie ako daný blok. Výsledná kvalita z okna je následnej priradená celému danému bloku. Pri následnej implementácii bolo zistené, že najlepšie výsledky sú dosiahnuté pri použitých veľkostiach 12×12 pixelov pre blok, a 28×28 pixelov pre okno. To znamená, že okno každého bloku presahuje až 8 pixelov do okolitých blokov.



Obr. 5.3: Príklad okna (červená farba) okolo práve spracovávaného bloku.

Tento spôsob ma však aj niekoľko nevýhod. Za prvé, vstupný obrázok nebude mať vždy rozmery rovné nejakému násobku veľkosti bloku, a pri rozdelení obrázku na bloky bude zväčša niekoľko pixelov prevyšovať. NFIQ rieši tento problém zarovnaním doplnením pixelov s farbou 50% odtieňu šedej, to sa však ukázalo v tomto prípade veľmi neefektívne, nakoľko takto doplnené bloky boli následne ohodnotené spravidla nulovou kvalitou. Keďže hrany obrázku aj tak väčšinou neobsahujú dôležité informácie, ale pozadie, bude veľkosť obrázka orezaná na násobok veľkosti bloku.

Ďalším problémom sú hraničné bloky, respektívne ich okno, ktoré presahuje hranice obrázka. Za najvhodnejšie riešenie bolo zvolené hraničné bloky nespracovávať priamo, ale ich kvalitu prevziať zo susedných okolitých blokov, ktorých okno do daných hraničných blokov z veľkej časti presahuje a odráža v sebe ich kvalitu.

5.2 Odlíšenie odtlačku od pozadia

Pred samotným spracovaním jednotlivých blokov je ešte potrebné určiť, ktoré bloky sa budú spracovávať, respektívne odlíšiť bloky patriace odtlačku od pozadia. Použitý algoritmus funguje na princípe porovnávania distribúcií úrovni čiernej farby jednotlivých blokov. Oblasti s dobre rozlíšiteľnými papilárnymi líniami, resp. s vysokým kontrastom, musia obsahovať širokú škálu intenzít čiernej (od čo najtmavšej farby v strede pap. línie po čo najbledšiu farbu medzi nimi), čiže rozloženie distribúcie farieb musí byť široké. Naopak, u oblastí s nízkym kontrastom bude distribúcia farieb pomerne úzka. Hodnota minimálnej požadovanej šírky distribúcie farieb C_c bola odvodená experimentálne a pre 8 bitovú hĺbku farieb bola určená hodnotou 25. To znamená, že ak sa v časti obrázka nenachádzajú odtiene v rozsahu aspoň 25, je daná časť označená za pozadie. V prípadoch, keď je hodnota C_c nižšia, pozadie odtlačkov, ktoré nie je dokonale hladké, ale obsahuje jemný šum, je často nesprávne označované ako plocha patriaca odtlačku, a naopak, u vyšších hodnôt C_c môžu byť menej kontrastné časti odtlačku nesprávne označené ako pozadie.

Táto metóda však v praxi niekedy zlyhávala kvôli rôznym jemným nedokonalostiam v odtlačku (napríklad biely blok jasne patriaci pozadiu, obsahujúci však niekoľko málo chybných čiernych pixelov, čo malo za následok priradenie takejto časti odtlačku a nie pozadiu), preto je histogram farieb pred samotným zistením kontrastu orezaný o 5% najvyšších a najnižších intenzít.

5.3 Vypočítanie orientácií

Základným krokom pre akékoľvek ďalšie spracovanie odtlačku je vypočítanie poľa orientácií. Každý z blokov obrázku je postupne otáčaný okolo svojho stredu. Keďže veľkosť uhla otáčania je nastavená na 10 stupňov, a orientácie jednotlivých blokov môžu dosahovať hodnoty v rozmedzí 0 až 179 stupňov, získame týmto spôsobom 18 rôzne otočených častí bloku. Pre každú z orientácií je následne spočítaná suma pixelov vo vertikálnom smere, ktorou vznikne vektor 28 súm pixelov. V prípade, že je orientácia správna, hodnoty spočítaného vektora by mali mať tvar sínusoidnej krivky, ktorá by mala odrážať štruktúru jednotlivých papilárných línií. Ak však orientácia nie je správna, hodnoty vektora by mali predstavovať neidentifikovateľný šum. Cieľom tohto kroku je teda skontrolovať všetkých 18 rôznych vektorov súm pixelov a nájsť ten, v ktorom budú jednotlivé papilárne línie čo najjasnejšie.

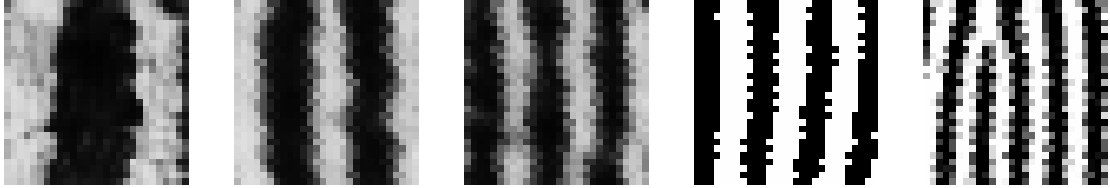
Jednotlivé sumy vektorov v daných smeroch si teda môžeme vyjadriť ako už navzorkovaný signál, v ktorom sa snažíme nájsť nejakú frekvenciu sínusoidného signálu. Na jej nájdenie využijeme diskretnú Fourierovú transformáciu (ďalej označovanú skratkou DFT), ktorú si vo všeobecnom tvare môžeme vyjadriť ako [7]:

$$S[n] = \sum_{k=0}^{N-1} s[k] e^{-\frac{2\pi i}{N} kn}; k = 0 \dots N-1$$

kde s je vstupný diskretný signál dĺžky N (v našom prípade vektor sumy pixelov v danom smere o dĺžke 24), a n predstavuje práve porovnávanú frekvenciu. Výsledkom DFT je pre každú z porovnávaných frekvencií číslo, ktorého veľkosť je priamoúmerná podobnosti vstupného signálu s danou frekvenciou. Za výslednú frekvenciu teda vyberieme frekvenciu s najväčším DFT skóre.

Dôležitým prvkom na zváženie je rozsah frekvencií, ktoré budeme so vstupným vektorom porovnávať. Vzhľadom na veľkosť spracovávaného okna (28×28 pixelov), boli porovnávané

frekvenciu určené na rozsah 1 až 5. Keďže frekvencia 1 predstavuje jednu papilárnu líniu o šírke 14 pixelov a vieme, že papilárne línie dosahujú šírku v rozmedzí 0,2 až 0,5 mm, dostávame rozlíšenie vstupného obrázka približne 1000 ppi. Naopak, pri maximálnej frekvencii 5, čiže papilárnej línií rozprestretej na zhruba 2,8 pixeloch, dostávame rozlíšenie obrázka približne 200 ppi. Porovnávať ešte vyššie frekvencie už zmysel nemá, pretože ich na 28 pixeloch nie je možné jasne zobrazit'. Obrázky, ktoré bude program schopný spracovať, budú mať preto rozlíšenie v rozsahu 200 až 1000 ppi. Pri použití iných rozlíšení je výstup DFT nepredvídateľný, a keďže určenie orientácií je základným krokom potrebným v každom ďalšom kroku výpočtu, zlyhalo by celé hodnotenie kvality.



Obr. 5.4: Reálne príklady spracovovaných oknien odtlačkov s papilárnymi líniami o frekvencií 1 až 5.

Výsledkom DFT je vektor hodnôt obsahujúci hodnoty pre každú s počítaných frekvencií, ktorých veľkosť je priamoúmerná podobnosti daných frekvencií so vstupným signálom. Za výslednú frekvenciu sa považuje frekvencia s maximálnou hodnotou.

Tieto vektory sú v súvislosti s ich 18 rotáciami vyjadrené maticou M , kde riadky predstavujú jednotlivé orientácie, a stĺpce jednotlivé frekvencie (1-5).

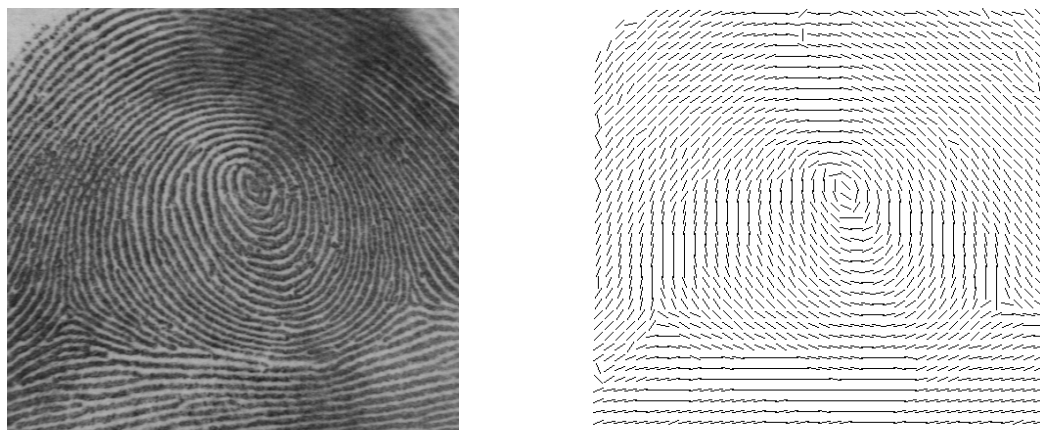
$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} df_{t0,0} \\ df_{t1,0} \\ \vdots \\ df_{t16,0} \end{matrix} & \begin{matrix} df_{t0,1} \\ df_{t1,1} \\ \vdots \\ df_{t16,1} \end{matrix} & \begin{matrix} df_{t0,2} \\ df_{t1,2} \\ \vdots \\ df_{t16,2} \end{matrix} & \begin{matrix} df_{t0,3} \\ df_{t1,3} \\ \vdots \\ df_{t16,3} \end{matrix} & \begin{matrix} df_{t0,4} \\ df_{t1,4} \\ \vdots \\ df_{t16,4} \end{matrix} & \begin{matrix} 10^\circ \\ 20^\circ \\ \vdots \\ 170^\circ \end{matrix} \end{matrix}$$

Za výslednú orientáciu označíme tú, ktorej DFT vektor (riadok matice M) obsahuje maximálnu hodnotu. Týmto spôsobom sa je však možné dopracovať k výslednej orientácii vždy, a to aj v prípade, že daná časť obrázka kvôli zlej obrazovej kvalite, prípadne inému poškodeniu žiadnu výraznú orientáciu nemá. Preto je nutné okrem výslednej orientácie poskytovať aj údaj vyjadrujúci dominanciu danej orientácie, respektívne istotu, že vypočítaná orientácia je správna (jej DFT skóre je dostatočne vzdialené od ostatných). Túto hodnotu budeme nazývať orientačná istota OI , a je daná podielom maximálnej hodnoty matice a priemerom hodnôt všetkých orientácií v danej frekvencii:

$$OI = \frac{M_{i,j}}{\frac{\sum_{n=1}^{18} M_{n,j}}{18}}; \quad M_{i,j} = \max M \quad (5.2)$$

V prípade, že je hodnota orientačnej istoty nízka, znamená to, že orientácia daného okna nemôže byť spoľahlivo určená. Keďže určenie orientácie je zásadný krok pre akékoľvek ďalšie spracovanie daného okna, nie je žiaduce, aby kvôli zlyhaniu prvého kroku zlyhali aj všetky ďalšie kroky. Preto sa v prípade, že je orientačná istota menšia ako prah OI_T , orientácie každého okna dopočítajú ako priemer orientácií najbližších okolitých blokov, u ktorých bolo možné orientáciu určiť spoľahlivo. Hodnota prahu OI_T bola vzhľadom na čo najpresnejšie

výsledky experimentálne určená na 2,8. Príklad takto zistených orientácií z odtlačku je zobrazený na obrázku 5.5.

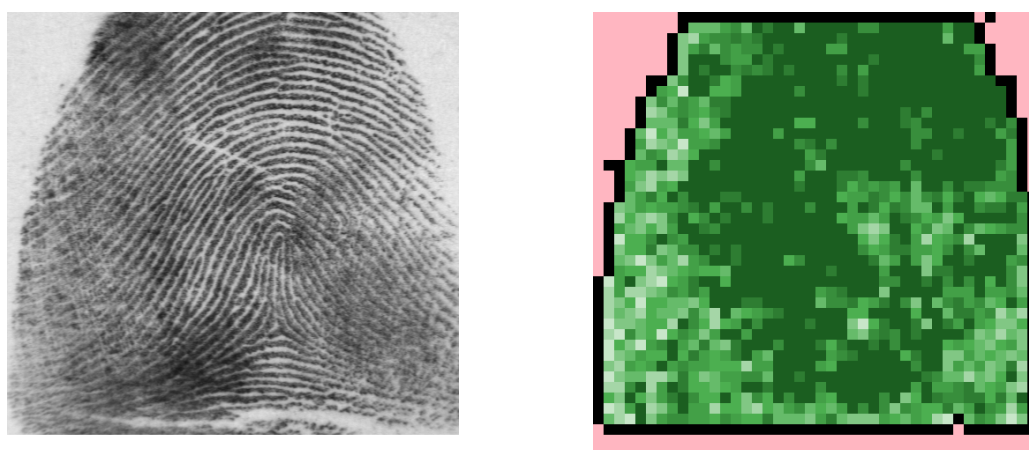


Obr. 5.5: Odtlačok prsta spolu s mapou získaných orientácií.

Keďže orientačná istota v sebe nepriamo odráža rezonanciu frekvencie (jasnosť papilárnej línie) v danom okne pri niektorej orientácii, môžeme jej hodnotou použiť ako jeden zo spôsobov vyjadrenia kvality odtlačku. Konkrétne mapovanie orientačnej istoty na kvalitu bolo určené experimentálne - použitá je lineárna funkcia, pričom za najhoršiu kvalitu 0% sa považuje hodnota OI menšia ako 1, a najlepšiu kvalitu 100% hodnota OI väčšia ako 6. Kvalitu Q_o na základe orientačnej istoty si preto môžeme vyjadriť ako:

$$Q_o = \begin{cases} 0, & \text{ak } OI \leq 1 \\ 100, & \text{ak } OI \geq 6 \\ \frac{OI - 1}{5} * 100 & \text{inak} \end{cases} \quad (5.3)$$

Príklad kvality odtlačku vyjadrenej pomocou Q_o je na obrázku 5.6. Tento princíp však sám o sebe nie je dostačujúci a výsledná kvalita môže byť často skreslená, preto sa orientačná kvalita bude používať len ako jeden z viacerých faktorov ovplyvňujúci finálnu kvalitu.



Obr. 5.6: Odtlačok prsta spolu s mapou kvality vyjadrenej z orientačnej istoty Q_o .

5.4 Rozdelenie okna na časti

V nasledujúcich výpočtoch budeme pracovať s časťami odtlačku vyjadrenými vektormi sínusoidného tvaru, tvorenými pixelmi v smere kolmom na orientáciu v danom bode, vypočítaní v predchádzajúcom kroku. Pri počítaní orientácií, kde sínusový vektor vznikol súčtom vertikálnych pixelov celého spracovávaného okna, sme postupovali podobne. Keďže pri výpočte orientácií sme len hľadali najvyhovujúcejší vektor, bola táto metóda dostatočná. V prípade, že chceme daný vektor zároveň aj presne ohodnotiť, už dostatočná byť nemusí. Pri vyjadrení vektora z celého okna o veľkosti 28×28 pixelov totiž výsledný vektor nemusí odpovedať očakávaniam - stačí, ak by papilárne línie v okne neboli úplne rovnobežné (napr. by sa jemne zatáčali do strany, čo je typické hlavne v oblastiach delty a jadra odtlačku), a výsledný vektor vertikálneho súčtu pixelov by už mohol mať sínusoidný tvar zdeformovaný. Z tohto dôvodu sa dané okno rozdelí na 4 časti v smere kolmom na smer orientácie (obr. 5.7). Získame tak 4 vektory, ktoré popisujú jednotlivé časti okna presnejšie a zároveň umožňujú sledovať nové vlastnosti, napr. kontinualitu jednotlivých častí.



Obr. 5.7: Časť odtlačku rozdelená na menšie časti, ktoré sa budú spracovávať samostatne.

5.5 Kontinualita

Jednou z požiadaviek na kvalitu je kontinualita papilárnych línií, ktorá má za účel reflektovať všetky ich prerušenia a náhle zmeny orientácií. Kontrola spočíva v spočítaní frekvencií pomocou DFT pre každú zo 4 častí okna, získaných podľa kapitoly 5.3. Za kvalitné bloky môžeme označiť tie, ktorých frekvencie jednotlivých častí sú rovnaké. Často sa však stáva, že okno neobsahuje celý počet papilárnych línií, ale aj časť ďalšej pap. línie. V tom prípade by presná frekvencia bola niekde v rozmedzí dvoch susedných frekvencií, čo môže mať za následok priradenie dvoch rôznych frekvencií jednotlivým častiam aj napriek žiadnym prerušeniam pap. línií. Tolerovaná odchýlka jednotlivých frekvencií bola preto nastavená na hodnotu 1. Celkové skóre za kontinualitu Q_{cb} v rámci jedného okna je vyjadrené nasledovne:

$$Q_{cb} = \begin{cases} 100, & \text{ak } S_f \leq 0.5 \\ 0, & \text{ak } S_f \geq 2.5 \\ 100 - \left(\frac{S_f - 0.5}{2} * 100 \right) & \text{inak} \end{cases} \quad (5.4)$$

kde S_f predstavuje smerodajnú odchylku frekvencií jednotlivých častí okna.

Vzhľadom na lepšiu detekciu poškodení nebudeme kontinualitu pap. línií kontrolovať len v rámci daného okna, ale takisto aj voči svojmu najbližšiemu okoliu - takúto kontinualitu označíme Q_{cn} a je daná:

$$Q_{cn} = \begin{cases} 100, & \text{ak } S_o \leq 10 \\ 0, & \text{ak } S_o \geq 40 \\ 100 - (\frac{S_o - 10}{30} * 100) & \text{inak} \end{cases} \quad (5.5)$$

kde S_o predstavuje smerodajnú odchylku rozdielov orientácií daného okna voči 8 najbližším okolitým oknám.

5.6 Využitie lineárnej regresie

Lineárna regresia je štatistická matematická metóda používaná na modelovanie a predikciu vzťahov medzi závislými a nezávislými premennými [19]. Špeciálny prípad lineárnej regresie, ktorý budeme využívať a je založený na existencii len jednej závislej premennej, sa nazýva jednoduchá lineárna regresia (ďalej označovaná ako SLR). Predpokladá, že hodnoty nezávislých premenných sú presné (v grafe zväčša vyjadrené osou x), zatiaľ čo hodnoty závislých premenných môžu byť ovplyvnené náhodnou chybou. Cieľom SLR je nájsť lineárnu funkciu, respektívne priamku pretínajúcu body grafu tak, aby súčet najkratších vzdialeností všetkých závislých premenných k priamke bol čo najmenší. Takúto lineárnu funkciu $f(x)$ si môžeme vyjadriť ako:

$$f(x) : y = \beta_0 + \beta_1 x + e \quad (5.6)$$

kde β_0 a β_1 sú neznáme konštanty reprezentujúce začiatok a sklon lineárnej priamky a e predstavuje odchýlku funkcie od pôvodných premenných. Na základe odhadov $\hat{\beta}_0$ a $\hat{\beta}_1$ si odhady hodnôt závislých premenných \hat{y}_i spolu s ich chybou e môžeme vyjadriť nasledovne:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i \quad (5.7)$$

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (5.8)$$

Odchýlka odhadovanej lineárnej funkcie voči pôvodným hodnotám sa spočíta metódou najmenších štvorcov, ktorých súčet RSS (*residual sum of squares*) je definovaný ako súčet druhých mocnín všetkých chýb e :

$$RSS = e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2 \quad (5.9)$$

Výpočet hľadaných koeficientov lineárnej funkcie β_0 a β_1 s ohľadom na čo najmenší RSS potom prebieha nasledovne:

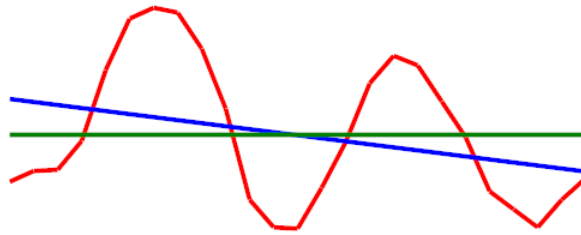
$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.10)$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (5.11)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (5.12)$$

Lineárna regresia ma široké využitie, či už v oblasti prírodných vied alebo financií. Jej vlastnosti boli v niekoľkých článkoch dokonca aplikované v oblasti problematiky odtlačkov prstov [3][12].

Jednoduchá lineárna regresia je u odtlačkov prstov použiteľná na odlíšenie údolí a pohorí. Ako vstupné dáta slúži sínusoidný vektor intenzít farieb získaný z kapitoly 5.4, na ktorom sa následne prevedie rez pomocou získanej lineárnej priamky. Časti vstupného vektora, ktoré sa nachádzali nad priamkou môžeme následne označiť ako pohoria, a zvyšné časti, ktoré sa nachádzali pod priamkou ako údolia. Ak je porovnávaný vektor uniformný (jednotlivé papilárne línie dosahujú približne rovnakú amplitúdu, respektívne rovnaké intenzity farieb), tak je výsledok jednoduchej lineárnej regresie veľmi podobný obyčajnému priemeru intenzít farieb. V prípade, že daný vektor nie je dokonale uniformný, poskytuje však lineárna regresia podstatne lepšie rozdelenie, bližšie ľudskému rozoznávaniu. Obrázok 5.8 porovnáva rozdelenie vektora na údolia a pohoria pomocou lineárnej regresie a priemeru.



Obr. 5.8: Rozdelenie vektora odtieňov čiernej na údolia a pohoria pomocou priemeru hodnôt (zelená priamka) a pomocou lineárnej regresie (modrá priamka).

Z rozdelenia vektora na údolia a pohoria môžeme získať niekoľko informácií vyjadrujúcich ich zreteľnosť, resp. kvalitu ich štruktúry. Za ideálnu štruktúru vektora môžeme tú, v ktorej sú odtiene farieb patriace papilárnym líniam a odtiene patriace údoliam oddelené, a neprekývajú sa. Veľkosť prekrytia histogramov farieb údolí a pohorí H_r je daná:

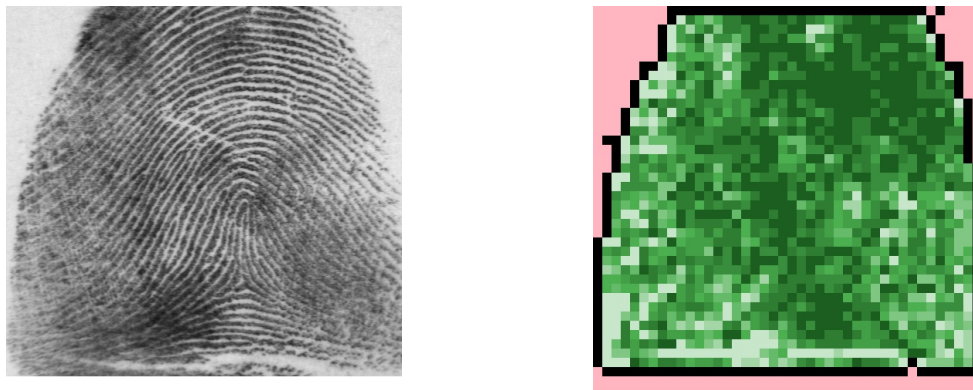
$$H_r = \frac{\frac{H_{rb}}{H_{ra}} + \frac{H_{vb}}{H_{va}}}{2} \quad (5.13)$$

kde H_{rb} (H_{vb}) predstavuje počet pixelov patriacich pohoriam (údoliam) prekývajúcej sa s údoliami (pohoriami), a H_{ra} (H_{va}) predstavuje celkový počet pixelov patriacich pohoriam (údoliam). Na základe H_r je následne vyjadrená kvalita Q_l , ktorá bola experimentálne určená lineárnou funkciou, kde za 100% kvalitu sa považuje nulové prekrytie pixelov údolí a pohorí, respektívne hodnota $H_r = 0$, a za najhoršiu kvalitu 0% sa považuje 50% prekrytie, čiže $H_r = 0.5$:

$$Q_l = \begin{cases} 100, & \text{ak } H_r \leq 0 \\ 0, & \text{ak } H_r \geq 0.5 \\ 100 - \left(\frac{H_r}{0.5} * 100\right) & \text{inak} \end{cases} \quad (5.14)$$

Takýmto vyjadrením kvality dokážeme získať približnú kvalitu odtlačku, avšak nie úplne spoľahlivo. 28 pixelov totiž niekedy nemusí byť úplne dostatočných na spoľahlivé rozlíšenie údolí a pohorí, obzvlášť u obrázkov s vyšším ppi (nižšou frekvenciou papilárných líní v

bloku), a môže dochádzať k nesprávnemu zníženiu kvality. Platí to však aj naopak, kedy lineárna regresia môže nájsť vyváženú štruktúru údolí a pohorí aj na miestach, kde to nie je žiaduce - napríklad v pozadí (stačí, aby mal šum reprezentujúci pozadie pravidelnú opakujúcu sa štruktúru). Preto je nevyhnutné túto metódu používať výlučne v spojení s inými metódami, prípadne kontrolovať nielen štruktúru, ale aj veľkosť amplitúdy vstupného vektora (kontrast). Príklad kvality vyjadrenej pomocou prekrytia histogramov údolí a pohorí Q_l je znázornený na obrázku 5.9.



Obr. 5.9: Odtlačok prsta spolu s mapou kvality získanej na základe prekryvania sa histogramov údolí a pohorí získaných pomocou jednoduchej lineárnej regresie.

Pomer údolí a pohorí

Lineárna regresia, respektívne jej rozdelenie vektora na údolia a pohoria nám umožňuje získať aj ďalšie informácie, napríklad o ich pomere. Pozorovaniami bolo zistené, že odtlačky, ktoré môžeme pohľadom subjektívne označiť ako kvalitné, majú ich pomer približne 1:1. Naopak, príliš suché odtlačky majú zväčša pomer pohorí menší a odtlačky mokré, prípadne až príliš zatlačené na senzor, majú ich pomer vyšší. Na základe týchto údajov si môžeme vyjadriť ďalší údaj kvality Q_r odrážajúci spomínané poškodenia:

$$D_{rv} = \left| \frac{P_r}{P_v} - 1 \right| \quad (5.15)$$

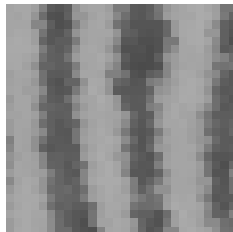
$$Q_r = \begin{cases} 100, & \text{ak } D_{rv} \leq 0,3 \\ 0, & \text{ak } D_{rv} \geq 1 \\ 100 - \left(\frac{D_{rv} - 0,3}{0,7} * 100 \right), & \text{inak} \end{cases} \quad (5.16)$$

kde P_r predstavuje počet pixelov patriacich pohoriam a P_v počet pixelov patriacich údoliam.

5.7 Kontrast

Všetky predchádzajúce metódy porovnávali len štruktúru vektora, čo však nie je dostatočné. Veľmi dôležité je okrem štruktúry hodnotiť aj kontrast, ktorý vyjadruje, ako veľmi je daná štruktúra viditeľná nielen algoritmom, ale aj voľným okom. Kvôli možným chybným jednotlivým pixelom je kontrast vektoru spočítaný ako rozdiel priemerov jeho 5% najvyšších

a 5% najnižších farebných intenzít pixelov. Pri skúmaní reálnych odtlačkov bolo zistené, že na to, aby bol obrázok dostatočne kontrastný na rozlíšenie voľným okom stačí, aby dosahoval len niečo kolo 30% maximálneho farebného rozsahu (približne 70 z 256 farebnej hĺbky 8 bitov). Preto je hodnota 100% kvality podľa kontrastu Q_c priradená vektorom s kontrastom aspoň 30%, a v závislosti s klesajúcim kontrastom lineárne klesá aj kvalita, až na hodnotu 0. Príklad časti odtlačku, ktorý je považovaný za kontrastne dostatočný (je mu priradená maximálna kvalita Q_c) je na obrázku 5.10.



Obr. 5.10: Príklad časti odtlačku, ktorý síce dosahuje len približne 30% z celkového možného kontrastu, ale aj tak sú jednotlivé údolia a pohoria jasne rozoznatelné, a je preto považovaný za kontrastne dostatočný (dosahuje maximálnu kvalitu Q_c).

5.8 Výsledné zhodnotenie kvality

Po prevedení predchádzajúcich výpočtov by mal každý blok obsahovať dostatok informácií na spoľahlivé určenie jeho kvality. Každý blok, ktorý nebol rozoznaný ako pozadie, obsahuje nasledujúce percentuálne ohodnotenia jednotlivých kvalít podľa:

- istoty orientácie Q_o
- prekryvania distribúcií farieb pohorí a údolí podľa lineárnej regresie Q_l
- pomeru pohorí a údolí Q_r
- kontinuity štruktúry v rámci jedného bloku Q_{cb}
- kontinuity orientácií vzhľadom na okolité bloky Q_{cn}
- rozsahu kontrastu Q_c

Každá z týchto vlastností dokáže premietnuť rôzne poškodenia. Často sa stáva, že niektoré vyjadrenia kvalít nezachytia nejaké poškodenie, ale len výnimočne, a len u vyjadrenia kvality pomocou Q_l sa stáva, že dosiahnutá kvalita je nižšia ako by mala byť. Z tohto dôvodu je výsledná kvalita bloku Q_B spočítaná ako minimum vyjadrení jednotlivých kvalít, so špeciálnou, nižšou váhou pre Q_l , konkrétne:

$$Q_B = \min(Q_o, Q_r, Q_{cb}, Q_{cn}, Q_c, \bar{Q}_a) \quad (5.17)$$

kde \bar{Q}_a je aritmetický priemer všetkých vyjadrení kvalít $Q_o, Q_l, Q_r, Q_{cb}, Q_{cn}$ a Q_c .

Výsledná kvalita celého odtlačku Q_F je následne spočítaná ako priemer kvalít blokov patriacich odtlačku. Pri počítaní výslednej kvality týmto spôsobom však nikdy nebola dosiahnutá 100% kvalita, a to ani v prípade, že odtlačok bol syntetický a dokonalý. Dôvod v nižšej kvalite spočíval v hranách odtlačku, ktoré sú vlastne prerušenia štruktúry papírných línií (poškodenia), a preto dosahujú nízke ohodnotenia, ktoré celkovú kvalitu vždy zbytočne znižujú. Z tohto dôvodu sa do celkového hodnotenia spolu s blokmi označenými ako pozadie nezapočítavajú ani hrany odtlačku.

Kapitola 6

Implementácia

Systém pre hodnotenie kvality odtlačkov bol implementovaný ako grafická aplikácia určená pre operačné systémy Microsoft Windows. Aplikácia je vytvorená v jazyku C#, s využitím .NET Framework verzie 4.5 a s grafickou užívateľskou nadstavbou Windows Forms. Pri vytáraní aplikácie bol kladený dôraz na objektový návrh a modularitu, čo má za úlohu uľahčiť jej prípadné budúce rozšírenia alebo úpravy.

6.1 Možnosti aplikácie

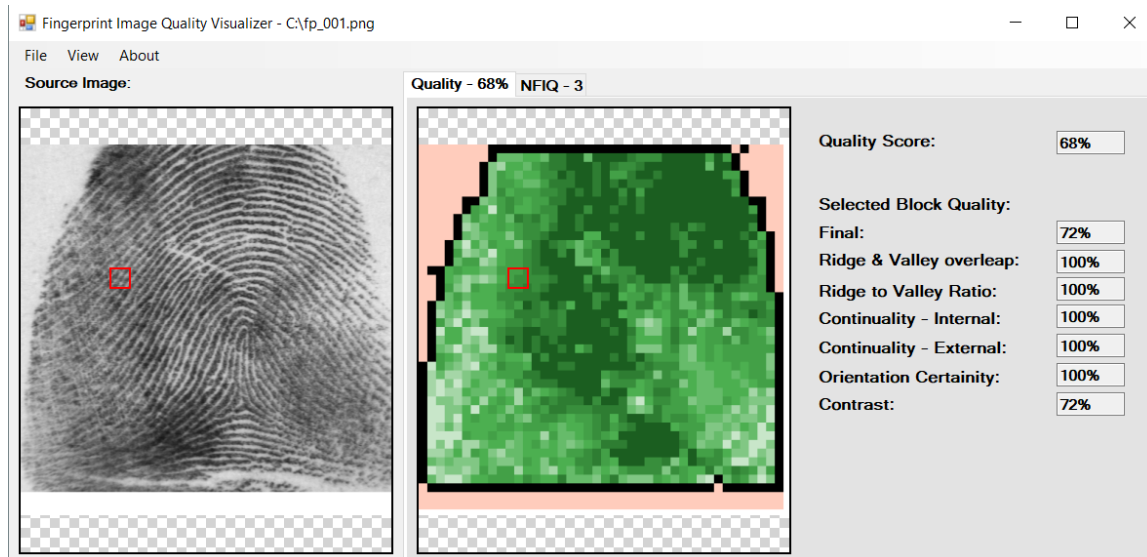
Hlavnou funkciou aplikácie je načítanie odtlačku a spočítanie jeho kvality. Keďže aplikácia obsahuje GUI, je výsledkom nielen číslo, ale aj obrázok zobrazujúci kvalitu. Ten umožňuje detailnejšie analyzovať priebeh hodnotenia, a zobrazíť užívateľovi časti odtlačku, ktoré obsahujú poškodenie. Obrázok kvality má rozlíšenie zhodné s pôvodným obrázkom odtlačku, a svojou farbou vyjadruje jeho vlastnosti v danej časti (v danom bloku, vid kapitola 5.1). Jednotlivé vlastnosti odtlačku sú v obrázku kvality vyjadrené rôznymi farbami:

- bledo oranžová - predstavuje okolie odtlačku (pozadie)
- čierna - predstavuje hrany odtlačku
- odtiene zelenej - predstavujú úroveň kvality v danej časti odtlačku; najkvalitnejšie časti dosahujú sýtu zelenú farbu, ktorá s klesajúcou kvalitou bledne až na úroveň bielej farby

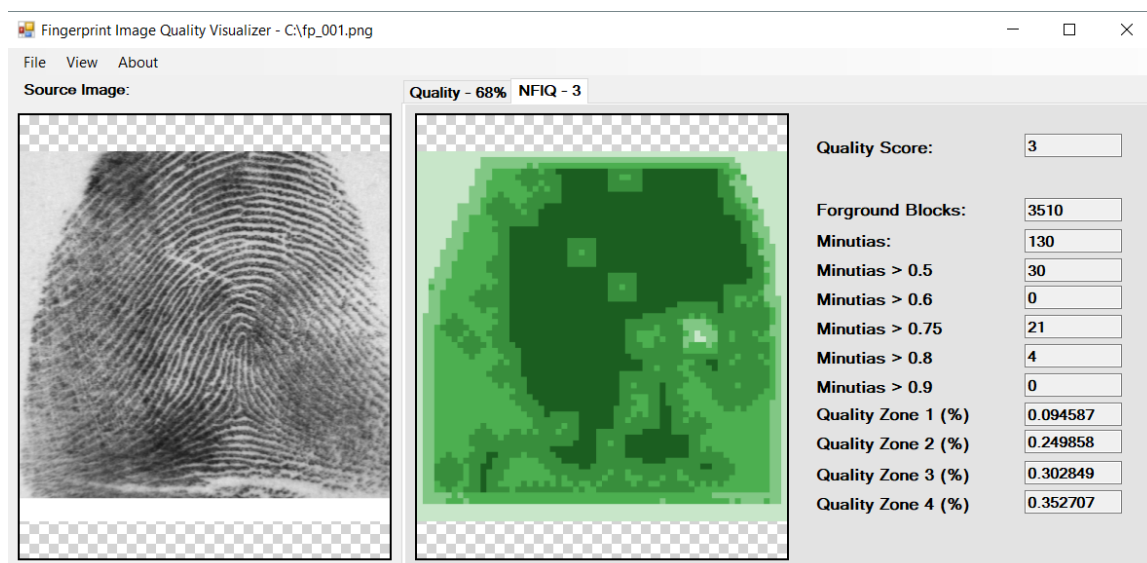
Takto vyjadrený obrázok kvality sa následne zobrazí bok po boku spolu s povôdnym odtlačkom, čo umožňuje ich jednoduché porovnávanie. Oba obrázky je navyše možné synchronizovať približovať, oddaľovať a posúvať. Textové informácie o kvalite odtlačku sa nachádzajú v paneli na pravej strane aplikácie. Obsahujú výslednú kvalitu odtlačku spolu s ďalšími informáciami o časti odtlačku, ktorý si užívateľ vyznačí.

Okrem vizualizácie kvality pomocou nášho navrhnutého algoritmu umožňuje aplikácia zobrazíť obrázok kvality aj pomocou NFIQ a tak jednoducho zistiť, ako NFIQ pracuje a akým poškodeniam priraďuje akú kvalitu, prípadne jeho výsledky porovnať s novou metodikou. Vizualizácia NFIQ funguje pomocou analýzy vygenerovaných textových súborov z programu mindtct (ktorý musí byť spolu s nfiq prítomný v zložke s programom). Zároveň program automaticky konvertuje vstupné obrázky do formátu požadovaného NFIQ, čo podstatne uľahčuje prácu.

Ďalšou častou požiadavkou od užívateľov je ohodnotenie väčšieho počtu odtlačkov, bez ich podrobnejšej analýzy. Program preto umožňuje vloženie viacerých odtlačkov, ich ohodnotenie pomocou novej metodiky a voliteľne aj pomocou NFIQ. Výsledky sú následné vy-exportované do súboru v jednoduchom formáte *csv*.



Obr. 6.1: Obrázok aplikácie pri hodnotení odtlačku pomocou novej metodiky.



Obr. 6.2: Obrázok aplikácie pri hodnotení odtlačku pomocou NFIQ.

Kapitola 7

Porovnanie výsledkov

Jedným z hlavných dôvodov vyvíjania tejto novej metodiky hodnotenia kvality bolo odstrániť nedostatky NFIQ. Preto si ako prvé ukážeme ohodnotenie syntetických odtlačkov vytvorených programom SFinGe, do ktorých boli pomocou programu Ing. Bárty dogenerované poškodenia, a na ktorých NFIQ zlyháva.

	priemerná hodnota	medián	smerodatná odchylka
Pôvodné odtlačky	92	92	1,47
Odtlačky s ekzémom	80	82	7,01
Odtlačky s bradavicami	89	90	1,80

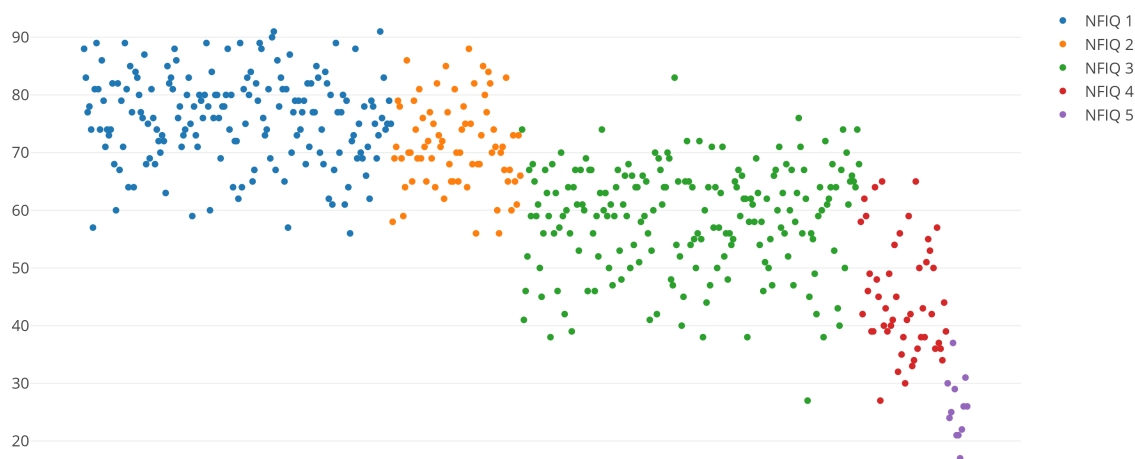
Tabuľka 7.1: Porovnanie priemerných skóre syntetických odtlačkov programu SFinGe, do ktorých boli vgenerované poškodenia programom z diplomovej práce Ing. Bárty, ohodnotených pomocou novej metodiky [2].

V tabuľke 7.1 môžeme vidieť skóre dosiahnuté poškodenými odtlačkami. Keďže odtlačky boli poškodené relatívne jemne, a všetky sú aj napriek poškodeniu stále rozoznatelné, pridelená kvalita sa znížila len nepatrne. Zakým u odtlačkov s ekzémom, kde jemné zníženie kontrastu pokrývalo približne jeho polovicu, sa skóre znížilo v priemere o 12%, u odtlačkov s bradavicami, ktoré predstavujú bodové prerušenie štruktúry papilárnych línií, sa skóre zmenšilo len nepatrne. Reakciu nového algoritmu hodnotenia kvality môžeme preto na týchto odtlačkov označiť ako adekvátnu.

Napriek dobrej reakcii na vyššie testovanú dvojicu poškodení musí však nový algoritmus vedieť správne ohodnotiť aj nepoškodené odtlačky. Podobne ako u NFIQ, bude za testovaciu vzorku odtlačkov znova použitá verejne dostupná databáza NIST Special Database 4. Z pozorovaní vyplynulo, že odtlačky, ktoré boli algoritmom ohodnotené najvyššou kvalitou (ktorá dosahovala okolo 90%), boli zároveň odtlačky bez žiadnych poškodení alebo prerušení, s jasne rozoznatelnými papilárnymi líniami. Najnižšou kvalitou, približne 20%, boli ohodnotené vizuálne najhoršie odtlačky. Veľmi ojedinelé boli prípady, kedy odtlačky dosahovali kvalitu vyššiu ako 95%, tie sa však vyskytovali len u dokonalých syntetických odtlačkov. Narozdiel od NFIQ, kde určiť kvalitu daných odtlačkov voľným okom je veľmi ťažké (a u kvality 1 až 3 prakticky nemožné), je aspoň približné určenie kvality podľa novej metodiky oveľa jednoduchšie.

Takéto určovanie kvality je však veľmi subjektívne, preto je vhodnejšie výsledky porovnať priamo s inými metódami hodnotenia kvality. Obrázok 7.1 ukazuje graf porovnania nového algoritmu s NFIQ. Ako môžeme vidieť, s klesajúcou kvalitou podľa NFIQ klesá aj

priemerná kvalita podľa novej metodiky (okrem tried 1 a 2, kde je vizuálna kvalita prakticky nerozoznatelná). Rozptyl kvalít v jednotlivých triedach NFIQ je však pomerne veľký (okolo 30%) čo má za následok, že odtlačok sa kvalitou 55% sa síce s najväčšou pravdepodobnosťou bude nachádzať v NFIQ triede 3, ale môže byť priradený prakticky do všetkých tried v rozmedzí 1 až 4. Príklad takejto štvorice odtlačkov, ktoré dosahujú zhodné skóre 57%, ale patria do 4 rôznych NFIQ tried, je na obrázku 7.2. Môžeme z neho vidieť, že vizuálna kvalita týchto odtlačkov je naozaj veľmi podobná, a preto môžeme tieto krajné nezhody medzi metodikami priradiť NFIQ, ktoré samo upozorňuje, že jeho výsledky nie vždy odzrkadľujú vizuálnu kvalitu odtlačku.



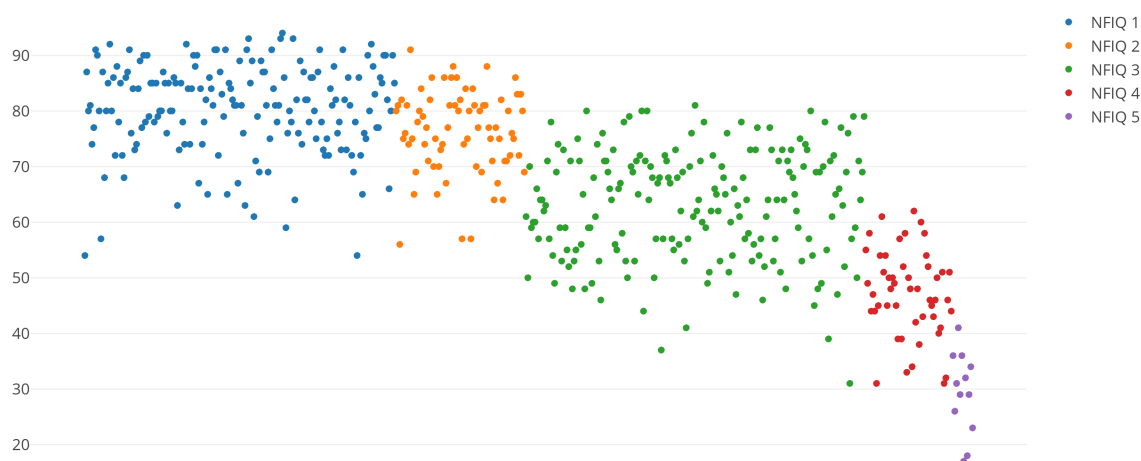
Obr. 7.1: Skóre odtlačkov patriacich do jednotlivých NFIQ tried, dosiahnuté pomocou novej metodiky hodnotenia kvality.



Obr. 7.2: Odtlačky dosahujúce zhodné skóre 57%, patriace však do rôznych NFIQ tried v rozsahu 1 až 4 (zľava doprava).

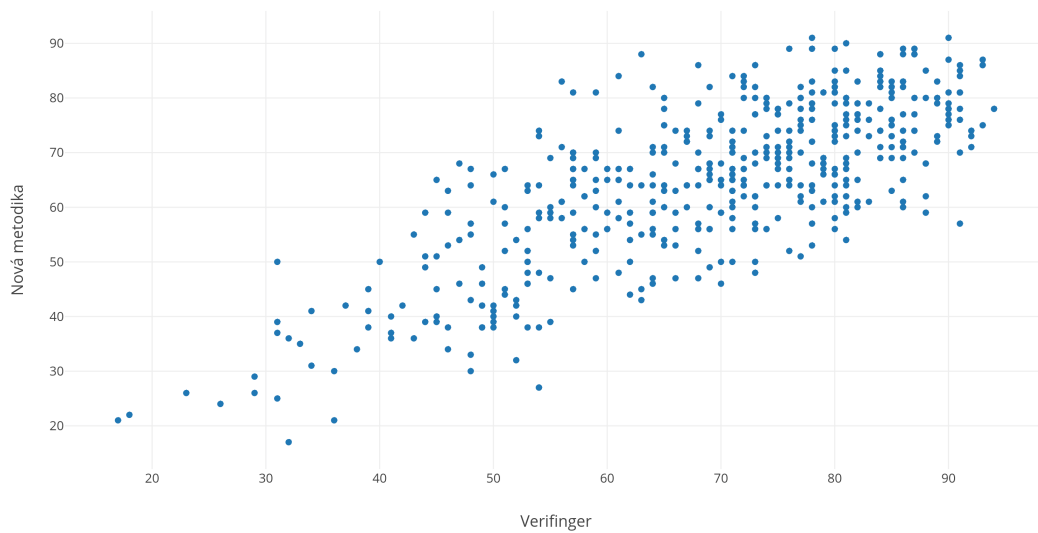
Ďalším programom, s ktorým budeme novú metodiku porovnávať, je VeriFinger. VeriFinger je technológia identifikácie odtlačkov prstov navrhnutá pre vývojárov biometrických systémov, ktorá poskytuje rýchle a spoľahlivé porovnávanie biometrických vzorov 1:1 (verifikácia), ako aj 1:N (identifikácia). Technológia je dostupná pre všetky operačné systémy (Windows, Linux, Mac OS X, Android aj iOS). Hodnotenie kvality odtlačkov však nie je hlavnou náplňou VeriFinger-u, a poskytuje ju len ako doplnkovú funkciu na zamedzenie registrácie odtlačkov nedostatočnej kvality. Kvalita odtlačkov je hodnotená percentami v rozmedzí 0 až 100, z voľne dostupnej dokumentácie však nie je jasné, podľa akých kritérií

kvalitu hodnotí (a keďže je to komerčný softvér, zdrojové kódy dostupné nie sú). Kvalitu môže hodnotiť z vizuálneho hľadiska, z hľadiska výkonnosti vzhľadom na svoj vlastný porovnávač odtlačkov, prípadne kombináciou oboch metód. Aby sme získali lepšiu predstavu o hodnotení kvality podľa VeriFinger-u, obsahuje obrázok 7.3 graf jeho porovnania s NFIQ. Môžeme si všimnúť, že hodnotenie kvality jednotlivých NFIQ tried podľa VeriFinger-u veľmi pripomína naše porovnanie novej metodiky s NFIQ z obrázku 7.1. Maximálne a minimálne hodnoty kvality, ako aj rozptyly kvalít v jednotlivých NFIQ triedach sú veľmi podobné, hlavným rozdielom algoritmov je, že zakým nová metodika odsádza razantnejšie 2. a 3. triedu NFIQ, VeriFinger 3. a 4. Priame porovnanie našej novej metodiky s VeriFinger-om je na obrázku 7.4. Z grafu je vidieť, že obe hodnotenia kvality približne odpovedajú, s jednotlivými rozptylmi kvalít približne 20%.

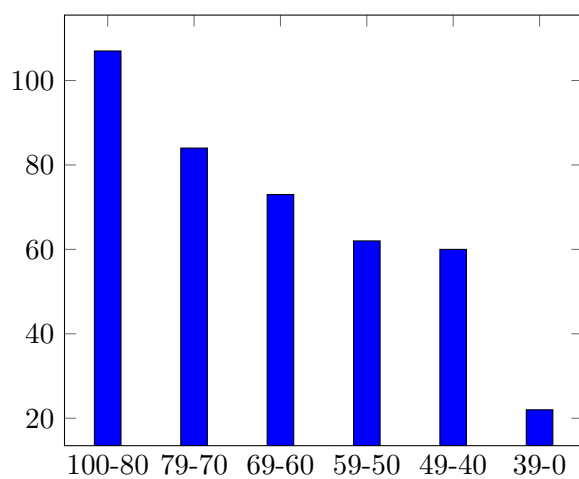


Obr. 7.3: Skóre odtlačkov patriacich do jednotlivých NFIQ tried, dosiahnuté pomocou programu Verifinger.

Graf na obrázku 7.5 znázorňuje priemerné dosiahnuté skóre pri porovnávaní dvojíc odtlačkov v jednotlivých kvalitatívnych rozsahoch. Ako porovnávaní softvér bol zvolený *BOZORTH3*, ktorý využíva NFIQ. Aby boli nasimulované čo najreálnejšie podmienky, porovnávané boli len tie dvojice odtlačkov, z ktorých aspoň jeden dosahoval kvalitu väčšiu ako 70%, a mohol preto slúžiť ako kvalitný referenčný vzor. Z grafu vyplýva, že kvalita získaná pomocou novej metodiky je priamoúmerná výkonnosti daného porovnávača, čo potvrdzuje správnu funkčnosť novej metodiky.



Obr. 7.4: Skóre odtlačkov dosiahnutých pomocou novej metodiky v porovnaní so skóre dosiahnutým pomocou programu VeriFinger.



Obr. 7.5: Priemerné skóre dosiahnuté dvojicami odtlačkov pri porovnávaní pomocou softvéru *BOZORTH3*, rozdelené do 6 tried podľa ich kvality.

Kapitola 8

Záver

Hlavným cieľom tejto práce bolo zoznámenie sa s biometrickým štandardom na určovanie kvality odtlačkov prstov nazývaného NFIQ, identifikácia jeho slabín, a navrhnutie alternatívnej metodiky riešiacej zistené nedostatky. Funkcionalita NFIQ bola podrobne testovaná na niekoľkých tisícoch odtlačkoch pochádzajúcich z rôznych databáz a bolo zistené, že vo väčšine prípadov sa NFIQ správa podľa očakávaní. Bolo však objavených aj niekoľko špecifických prípadov, kde odtlačky dôsledkom rôznych poškodení na kvalite získali, čo je rozhodne nežiaduca funkcionalita. Tieto prípady boli podrobne analyzované, a zistené skutočnosti boli zohľadnené pri návrhu novej metodiky tak, aby sa rovnaké nedostatky už neopakovali.

Nová metodika hodnotenia kvality je založená na vizuálnej kvalite odtlačku a hodnotí nielen vernosť zobrazenia odtlačku voči skutočnosti, ale zároveň detekuje aj rôzne jeho poškodenia. Navrhnutá metodika bola úspešne implementovaná v programovacom jazyku C#, a umožňuje užívateľovi nielen odtlačky ohodnotiť a výsledky vizualizovať vhodným obrázkom, ale aj ich priamo porovnávať s NFIQ.

Výsledky implementácie boli testované na rôznych voľne dostupných databázach. U syntetických poškodených odtlačkov, u ktorých NFIQ chybovalo, sa naša implementácia zachovala správne, poškodenia zdetekovala, a výslednú kvalitu daných odtlačkov oproti ich nepoškodeným verziám adekvátne znížila. Zhodnotenie funkčnosti na reálnych, nepoškodených odtlačkoch je však pomerne subjektívna záležitosť, nakoľko neexistuje jedno jediné smerodajné hodnotenie kvality, voči ktorému by sme mohli výsledky porovnávať. Preto boli výsledky porovnané s dvojicou už existujúcich metodík. Pri porovnaní s NFIQ sa zistilo, že odtlačky patriace do jeho vyššej kvalitatívnej triedy dosahujú v priemere vyššie hodnotenie aj pomocou našej metodiky aj napriek tomu, že NFIQ kvalitu odtlačkov neposudzuje na základe ich vizuálnej stránky. Výsledky druhého porovnávania s programom VeriFinger boli taktiež podobné, a preto môžeme implementáciu našej metodiky označiť za funkčnú.

Nemôžeme však očakávať, že nová metodika bude v každom jednom ohľade lepšia ako NFIQ, ktoré bolo vyvíjané početným tímom ľudí počas niekoľkých rokov. Reálny prínos novej metodiky môže preto spočívať hlavne v spolupráci s NFIQ. Vhodným príkladom môže byť simultánne hodnotenie kvality pomocou oboch metodík naraz, pričom výsledná kvalita by predstavovala minimum oboch metodík. Keďže obe metodiky posudzujú podľa rôznych kritérií a detekujú rôzne druhy poškodení, ich spojením by sa mohol zvýšiť ako aj rozsah detekovaných poškodení, tak aj robustnosť celkového hodnotenia kvality.

Ak by sme chceli hodnotenie kvality vylepšiť ešte viac, ako vhodné riešenie sa ponúka detekcia typu poškodenia, respektívne automatické identifikovanie prípadných chorôb v odtlačku. To by umožnilo dané poškodenia hodnotiť nielen podľa veľkosti postihnutej plochy,

ale aj podľa ich závažnosti. V prípade, že by sa detekoval typ ochorenia, ktoré má vo zvyku sa šíriť, a následne úplne znemožniť porovnávanie daného odtlačku, by sa odtlačku mohla priradiť minimálna kvalita hneď. Inak povedané, možné budúce poškodenie celého odtlačku by mohlo byť detekované už v rannom štádiu, keď je odtlačok ešte bezproblémovo identifikovateľný. Následné okamžité zamietnutie takýchto odtlačkov (a vynútenie použitia iného prsta) už pri registrácii do biometrického systému by mohlo zvýšiť nielen presnosť celého procesu identifikácie, ale aj pohodlie užívateľa, ktorý by po určitom čase už nemusel byť systémom akceptovaný.

Literatúra

- [1] Barotová, S.; Drahanský, M.; Pernický, R.: *Detection of ridge damages in fingerprints recognition caused by skin diseases*. [Online; navštíveno 14.01.2018].
URL http://www.sersc.org/journals/IJSIP/vol9_no11/13.pdf
- [2] Bárta, M.: *Generation of skin disease into the synthetic fingerprints*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií.
- [3] Chen, T. P.; Jiang, X.; Yau, W. Y.: Fingerprint image quality analysis. In *Image Processing, 2004. ICIP '04. 2004 International Conference*, 2004, ISBN 0-7803-8554-3.
- [4] Drahanský, M.: *Fingerprint Recognition Technology - Related Topics*. LAP LAMBERT, 1999, ISBN 978-3-8443-3007-6.
- [5] Drahanský, M.: *Biometric Systems*. Kurz na Fakultě informačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Leden 2006.
URL <http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/BIO/>
- [6] Drahanský, M.; Doležel, M.; Urbánek, J.; aj.: *Influence of Skin Diseases on Fingerprint Recognition*. 2012, [Online; navštíveno 14.01.2018].
URL <https://www.hindawi.com/journals/bmri/2012/626148/>
- [7] Drahanský, M.; Orság, F.: *Biometrie*. Computer Press, 2011, ISBN 978-80-254-8979-6.
- [8] Garri, M. D.; Watson, C. I.; McCabe, R. M.; aj.: *User's Guide to NIST Fingerprint Image Software (NFIS)*. [Online; navštíveno 14.01.2018].
URL http://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=151534
- [9] Jain, A.; Flynn, P.; Ross, A.: *Handbook of Biometrics*. Springer, 2007, ISBN 978-0-387-71040-2.
- [10] Kanich, O.: *Fingerprint Damage Simulation*. LAP LAMBERT, 2014, ISBN 978-3-659-63942-5.
- [11] Komarinski, P.: *Automated Fingerprint Identification Systems (AFIS)*. Elsevier Academic Press, 2005, ISBN 0-12-418351-4.
- [12] Lim, E.; Jiang, X.; Yau, W.: Fingerprint image quality analysis. In *Proceedings. International Conference on Image Processing*, 2004, ISSN 1522-4880.
- [13] Maltoni, D.; Maio, D.; Jain, A.; aj.: *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer, 2009, ISBN 978-1-84882-253-5.

- [14] NIST: *NFIQ 2.0*. [Online; navštíveno 14.01.2018].
URL https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2016/12/07/nfiq2_report.pdf
- [15] NIST: *NIST Special Database 4*. [Online; navštíveno 14.01.2018].
URL <https://www.nist.gov/srd/nist-special-database-4>
- [16] Tabassi, E.; Wilson, C. L.; Watson, C. I.: *Fingerprint Image Quality*. [Online; navštíveno 14.01.2018].
URL http://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=905710
- [17] Tuč, D.: *Testing of the Environmental Influences on Fingerprints Sensors*.
Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií.
- [18] Watson, C. I.; Garriss, M. D.; Tabassi, E.; aj.: *User's Guide to NIST Biometric Image Software (NBIS)*. [Online; navštíveno 14.01.2018].
URL http://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=51097
- [19] Weisberg, S.: *Applied Linear Regression*. John Wiley & Sons, Inc, 2005, ISBN 9780471704096.
- [20] Wilson, C. L.; Watson, C. I.; Garriss, M. D.; aj.: *Studies of Fingerprint Matching Using the NIST Verification Test Bed (VTB)*. [Online; navštíveno 14.01.2018].
URL http://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=50783

Príloha A

Príklady odtlačkov jednotlivých kvalít podľa NFIQ

Príklady odtlačkov rozdelených do piatich kvalitatívnych tried určených NFIQ. Odtlačky pochádzajú z voľne dostupnej databáze NIST Special Database 4.



Obr. A.1: Príklady odtlačkov NFIQ kvality 1.



Obr. A.2: Príklady odtlačkov NFIQ kvality 2.



Obr. A.3: Příklady odtlačkov NFIQ kvality 3.



Obr. A.4: Příklady odtlačkov NFIQ kvality 4.



Obr. A.5: Příklady odtlačkov NFIQ kvality 5.

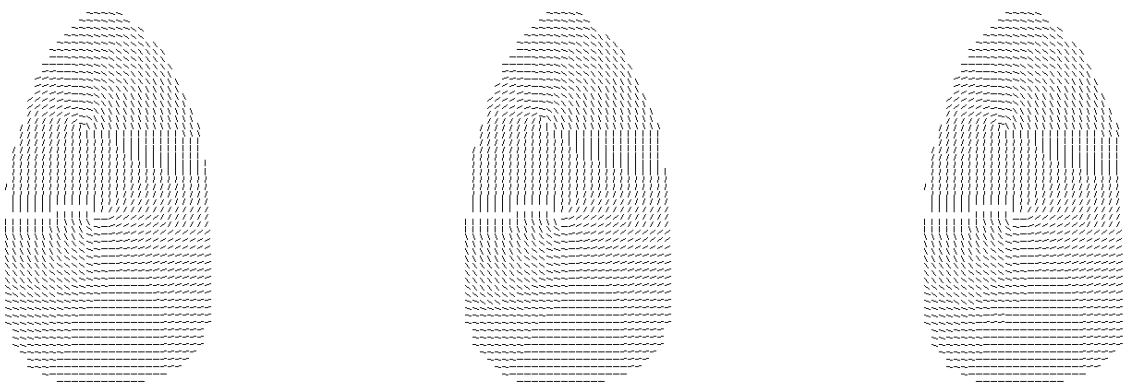
Príloha B

Analýza NFIQ v súvislosti s jemne poškodenými odtlačkami

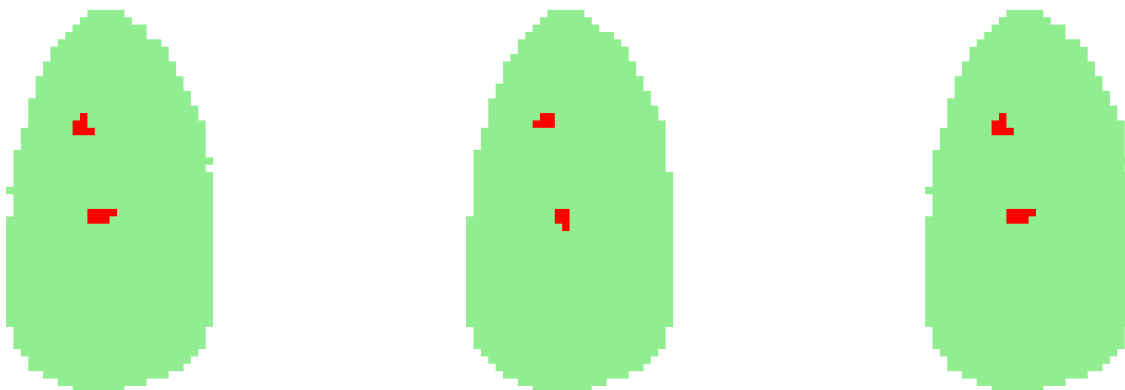
Nasledujúce obrázky predstavujú vizualizáciu výpočtu NFIQ vektora rysov programom MINDTCT zo syntetického odtlačku vygenerovaného pomocou SFinGe, a jeho kópií, do ktorých boli vgenerované poškodenia pomocou programu z diplomovej práce Ing. Bárty.



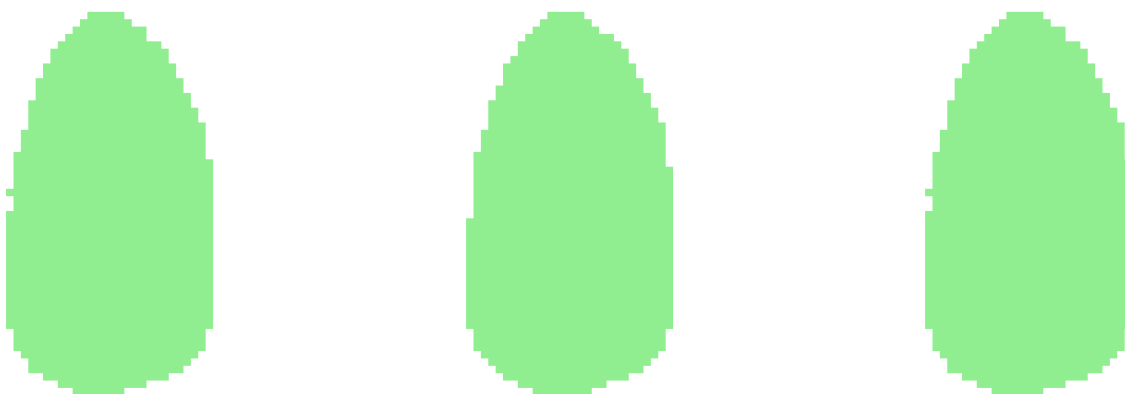
Obr. B.1: Pôvodné odtlačky.



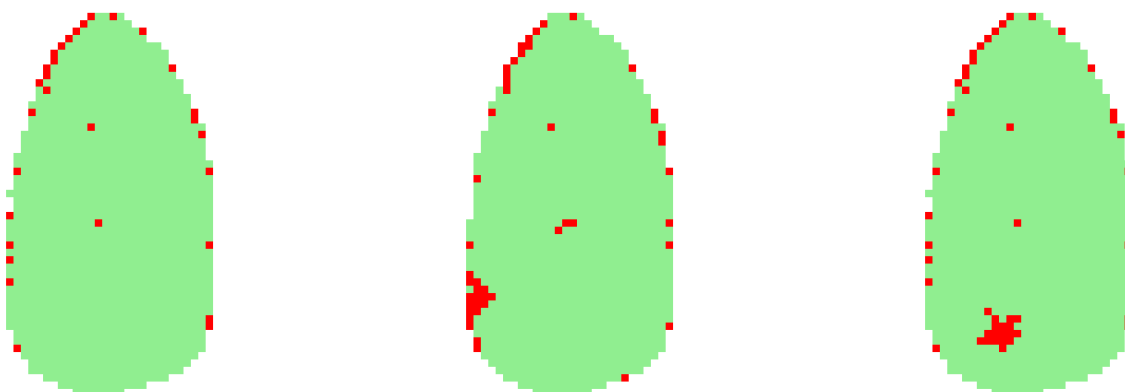
Obr. B.2: Mapa orientácií.



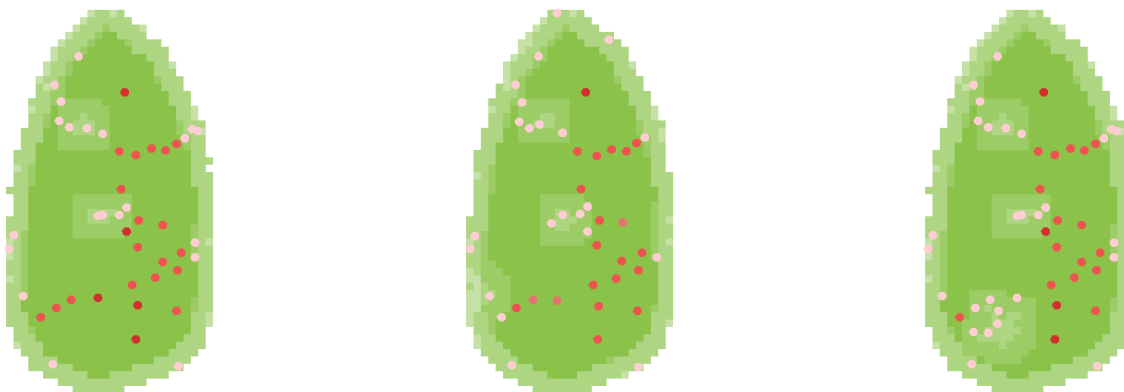
Obr. B.3: Mapa vysokého zakrivenia.



Obr. B.4: Mapa nízkeho kontrastu.



Obr. B.5: Mapa nejasnej štruktúry.

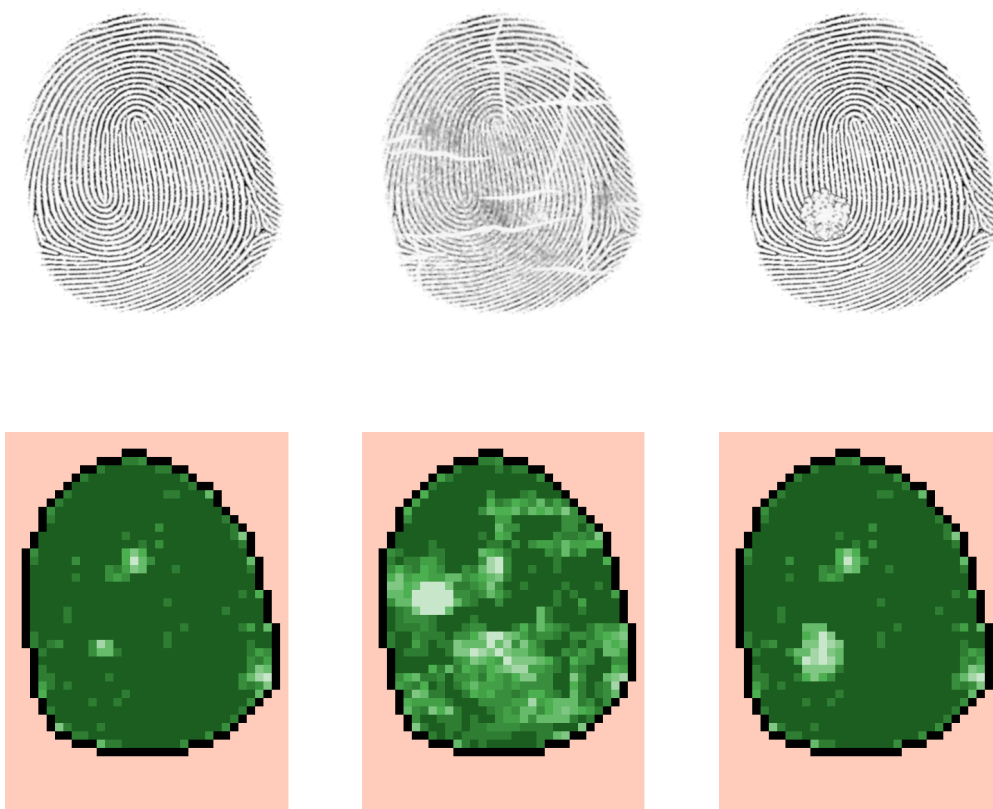


Obr. B.6: Výsledná mapa kvality + markanty.

Príloha C

Analýza novej metodiky v súvislosti s jemne poškodenými odtlačkami

Nasledujúce obrázky predstavujú vizualizáciu výpočtu kvality novej metodiky zo syntetického odtlačku vygenerovaného pomocou SFinGe, a jeho kópií, do ktorých boli vgenerované poškodenia pomocou programu z diplomovej práce Ing. Bárty.



Príloha D

Príklady odtlačkov jednotlivých kvalít podľa novej metodiky



Obr. D.1: Príklady najlepších odtlačkov, dosahujúcich kvalitu nad 90%.



Obr. D.2: Príklady odtlačkov dosahujúcich kvalitu v rozmedzí 70% až 90%.



Obr. D.3: Príklady odtlačkov dosahujúcich kvalitu v rozmedzí 50% až 70%.



Obr. D.4: Príklady odtlačkov dosahujúcich kvalitu v rozmedzí 30% až 50%.



Obr. D.5: Príklady najhorších odtlačkov dosahujúcich kvalitu menšiu ako 30%.

Príloha E

Obsah priloženého CD

- Elektronická verzia tejto práce vo formáte PDF.
- Spustiteľná aplikácia hodnotenia kvality odtlačkov.
- Zdrojové kódy aplikácie hodnotenia kvality odtlačkov.
- Uživatelská príručka aplikácie hodnotenia kvality odtlačkov.
- Časť voľne dostupnej databáze odtlačkov NIST Special Database 4 slúžiacej na testovacie účely.